



Technische Universität Berlin
Fakultät V - Verkehrs und Maschinensysteme
Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik (ISTA)
Fachgebiet Technische Akustik
Prof. Dr.-Ing. Ennes Sarradj

Masterarbeit zum Thema

Die Beeinflussung des Rollgeräusches durch Fehlstellen an der Schiene

Vorgelegt von:

Karlotta Proschitzki
Abgabedatum: 04.10.2020

Erster Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Ennes Sarradj
Zweite Prüferin / Betreuerin:	M.Sc. Katja Stampka
Betreuer:	Dr. Benjamin Baasch

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, den 04.10.2020

Karlotta Proschitzki

Abstract

In the context of an investigation of the effect of defects in rails on rolling noise, extensive measurements were carried out. These include investigations of the track condition through measurements of sleeper spacing, rail abrasion, rail roughness, the stiffness of the track superstructure and the track decay rate.

Measurements were carried out at two sections of the track with welded joints. Additionally, one of them had a circular drill hole in the longitudinal profile of the rail, and in the area of the other one, a change from one type of sleeper to another took place. As a reference, the measurements were repeated on a largely homogeneous track section. At the three measuring positions, measurements were performed with a locomotive and a road-rail vehicle at velocities below 30 km/h. Accelerations were measured with accelerometers on the rail and with axle box acceleration sensors on the train axle. In addition, sound measurements beside the track were performed.

Within this thesis, a methodology was developed to investigate the influence of track defects and irregularities on rolling noise with measurements both on the rail and at the vehicle axles. A comparison of track and vehicle measurements was performed. Thus it could be shown that the investigated defects influence the stiffness of the rail. They also have an influence on the results of the measurements with accelerometers on the rail. However, these anomalies could not be clearly identified in the measurements of axle box accelerations and acoustic farfield. The presented methods may be useful for further measurements at higher speeds and at other types of defects on the track.

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Untersuchung der Wirkung von Fehlstellen an Schienen auf das Rollgeräusch wurden umfangreiche Messungen durchgeführt. Diese beinhalten Untersuchungen der Gleisbeschaffenheit durch Messungen der Schwellenabstände, des Schienenabriebs, der Schienenrauheiten, der Steifigkeit des Oberbaus sowie des Abklingverhaltens der Schiene. Es wurden zwei Fehlstellen mit Schweißnähten an der Schiene betrachtet. Eine davon hatte eine zusätzliche Kreisbohrung im Längsprofil der Schiene und im Bereich der anderen fand ein Schwellenwechsel statt. Als Referenz wurden die Messungen an einem weitestgehend homogenen Gleisabschnitt wiederholt. An den drei Messpositionen erfolgten Messungen mit einer Lok und einem Zweiwegefahrzeug bei Geschwindigkeiten unter 30 km/h. Es wurden Beschleunigungen an der Schiene mit Beschleunigungsaufnehmern und an der Zugachse mittels Achslagerbeschleunigungssensoren gemessen sowie die Luftschallabstrahlung neben dem Gleis bestimmt.

Innerhalb dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, um den Einfluss von Fehlstellen auf das Rollgeräusch mit schienen- und fahrzeugseitigen Messungen zu untersuchen.

Es wurde ein Vergleich der Gleis- und Fahrzeugmessungen durchgeführt. So konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Fehlstellen die Steifigkeit der Schiene beeinflussen. Sie haben auch einen Einfluss auf die Ergebnisse der Messungen mit Beschleunigungsaufnehmern an der Schiene. Diese Auffälligkeiten waren jedoch nicht eindeutig in den Messungen der Achslagerbeschleunigungen und der Luftschallabstrahlung erkennbar.

Die vorgestellte Methodik kann für weitere Messungen mit höheren Geschwindigkeiten und an anderen Arten von Fehlstellen am Gleis von Nutzen sein.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Rollgeräusche bei Schienenfahrzeugen	3
2.1.1	Schienen- und Radrauheiten	5
2.1.2	Gleisabklingrate	6
2.1.3	Steifigkeit und Dämpfung der Schienenlagerung	7
2.2	Frequenzverhalten des Gleissystems	8
2.3	Fehlstellen an der Schiene	9
2.4	Körperschallmessungen im Schienenverkehr	10
3	Messungen an der Braunschweiger Hafenbahn	12
3.1	Messort	12
3.2	Schienenbeschaffenheit	14
3.3	Fehlstellen am Gleis	15
3.4	Fahrzeuge	17
3.5	Messequipment	18
3.6	Digitale Signalverarbeitung	20
4	Synchronisierung	21
4.1	Synchronisierung mittels UKW-Empfängern	21
4.2	Überprüfung des Systems	22
4.3	Datenverarbeitung	23
5	Aufbau und Durchführung der Messungen	24
5.1	Voruntersuchung und Auswahl des Messbereichs	24
5.2	Messung der Radrauheit	25
5.3	Messung der Schienenrauheit	27
5.4	Messung der Schwellenabstände	29
5.5	Messung der Steifigkeit	29
5.6	Messung des Abklingverhaltens der Schiene	30
5.7	Geschwindigkeitsmessung	32
5.8	Schwingverhalten der Schiene bei Zugvorbeifahrten	32
5.9	Messung der Luftschallabstrahlung bei Zugvorbeifahrten	36

6	Ergebnisse	37
6.1	Ergebnisse der Rauheitsmessungen	37
6.1.1	Rauheitsmessungen am Rad	37
6.1.2	Rauheitsmessung am Gleis	40
6.2	Schwellenabstände	41
6.3	Steifigkeitsmessungen	41
6.4	Gleisabklingrate	46
6.5	Schwingverhalten der Schiene bei Zugvorbeifahrten	47
6.5.1	BDS im Referenzschwellenfach	48
6.5.2	Vergleich mit den Fehlstellen	51
6.6	Synchronisierung der schienen- und fahrzeugseitigen Messungen	58
6.7	Achslagerbeschleunigungsmessungen	59
6.8	Luftschallabstrahlung	62
7	Zusammenfassung und Ausblick	65
A	Anhang	i
A.1	Sensoren zur Achslagerbeschleunigungsmessung an der Lok	i
A.2	TDR-Messungen	iii
A.3	Vorbeifahrtmessungen	vii
A.4	Rauheitsmessungen	xv
A.5	Achslagerbeschleunigungsmessungen	xx
	Literatur	xxii

Abbildungsverzeichnis

2.1	Illustration der Mechanismen in der Rollgeräuscentstehung [3, S.7]	4
2.2	Zwei-Massen-Schwinger als mechanisches Ersatzmodell für ein Gleis mit Schotter-Oberbau	8
3.1	Prüfabschnitt am Gleis nahe des Braunschweiger Binnenhafens	13
3.2	Gleis am Braunschweiger Hafen in negativer Fahrtrichtung	13
3.3	Skizze zur Bemaßung einer Schwelle	15
3.4	Fehlstellen am Gleis	16
3.5	Gemessene Fahrzeuge	18
5.1	Voruntersuchung der Schiene: Anschlagen der Schiene mit dem kleinen Impulshammer direkt neben einem Empfangsaufnehmer	25
5.2	Messaufbau der Rauheitsmessung mit dem m wheel Messgerät am RailDriVe . .	26
5.3	Nummerierung der Räder für die Messung der Radrauheit am RailDriVe mit dem m wheel in der Draufsicht	27
5.4	Messung der Schienenrauheit mit dem m rail	28
5.5	Einstellen des Tasters des m rail mit Bezug auf die Fahrspur	29
5.6	Vorgehen bei der Messung der Schwellenabstände ausgehend von der Schwelle mit der Nummer 0	29
5.7	Anschlagspositionen für die Steifigkeitsmessungen an den beiden Fehlstellen . .	30
5.8	Skizze der horizontalen Schienenansicht mit gekennzeichneten Beschleunigungsaufnehmerpositionen bei der TDR-Messung	30
5.9	Positionen der Beschleunigungsaufnehmer am guten Schwellenfach	35
5.10	Positionen der Beschleunigungsaufnehmer an der Fehlstelle 1 und 2	35
6.1	Gemittelte Terzband Rauheitspegel für die beiden linken Räder des RailDriVe . .	38
6.2	Gemittelte Rauheitspegel der vier Räder des RailDriVe im Vergleich mit der Grenzkurve nach DIN EN ISO 3095:2014 [16]	39
6.3	Vergleich der gemittelten Rauheitspegel der linken und rechten Schiene mit der Grenzkurve nach DIN EN ISO 3095:2014 [16]	40
6.4	Vergleich des Frequenzverlaufs des Absolutwertes der Mobilität der rechten Schiene gemessen in der Schwellenmitte zwischen Schwelle 0 und +1 mit dem kleinen und großen Impulshammer	42
6.5	Vergleich der Frequenzverläufe der Absolutwerte der Mobilität der rechten Schiene, gemessen an der Schwelle 0 und +1 mit dem kleinen Impulshammer	43

6.6	Vergleich der Frequenzverläufe der Absolutwerte der Mobilität der linken Schiene, gemessen an den Schwellenmitten im Bereich der Schwellen +23 bis +26 an der Fehlstelle 1 mit dem kleinen Impulshammer	44
6.7	Vergleich der Frequenzverläufe der Absolutwerte der Mobilität der rechten Schiene, gemessen an den Schwellen +31 bis +33 an der Fehlstelle 2 mit dem kleinen Impulshammer	45
6.8	Vergleich der Terzbandspektren der vertikalen TDRs	47
6.9	Zeitdaten des Beschleunigungsaufnehmers R7 bei Überfahrten mit der Lok und dem RailDriVe in positiver Fahrtrichtung	48
6.10	BDS bei Überfahrten mit der Lok (durchschnittlich 24,1 km/h) und dem RailDriVe (durchschnittlich 29,5 km/h) in positiver Fahrtrichtung und Maximalgeschwindigkeit gemessen am Beschleunigungsaufnehmer R7 in Schwellenfachmitte . . .	49
6.11	BDS bei Überfahrten mit der Lok (durchschnittlich 24,1 km/h) und dem RailDriVe (durchschnittlich 29,5 km/h) in positiver Fahrtrichtung und Maximalgeschwindigkeit gemessen am Beschleunigungsaufnehmer R1 über der Schwelle	50
6.12	BDS bei Überfahrten mit dem RailDriVe bei durchschnittlich 29,5 km/h in positiver Fahrtrichtung, linke Schiene, gemessen an den Beschleunigungsaufnehmern L14, L19 und L20	51
6.13	BDS bei Überfahrten mit dem RailDriVe bei durchschnittlich 30,1 km/h in negativer Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 1 (linke Schiene) und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach (rechte Schiene)	52
6.14	BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 24,6 km/h in negativer Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 1 (linke Schiene) und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach (rechte Schiene)	54
6.15	BDS bei Überfahrten mit dem RailDriVe bei durchschnittlich 30,1 km/h in negativer Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 2 (rechte Schiene) und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach (rechte Schiene)	55
6.16	BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 24,6 km/h in negativer Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 2 (linke Schiene) und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach (rechte Schiene)	57
6.17	Beispiel der Korrelationsfunktion der Radiosignale aus schienenseitigen und fahrzeugseitigen Messungen mit dem RailDriVe	58
6.18	Synchronisierte und normierte Zeitdaten der ABA-Messungen (Sensor links und rechts) mit den BA-Messungen (R1, F1 und F5) und Markierung des jeweiligen Zeitpunktes des Passierens des BA mit einer roten vertikalen Linie, gemessen mit dem RailDriVe in negativer Fahrtrichtung	59
6.19	Spektrale Leistungsdichte der ABA-Messungen in Abhängigkeit der Zeit und der Frequenz (oben: rechter Sensor, unten: linker Sensor), gemessen mit dem RailDriVe in negativer Fahrtrichtung, der Zeitpunkt des Passierens der BA F1, F5 und R1 ist jeweils mit einer vertikalen Linie gekennzeichnet	61
6.20	Vergleich PSD für Mikrofonposition 1 (gutes Schwellenfach) und Mikrofonposition 2 (Fehlstelle 2) bei Fahrzeugüberfahrten in negativer und positiver Fahrtrichtung mit dem RailDriVe (oben) und der Lok (unten)	63

6.21 Vergleich PSD für Mikrofonposition 1 (gutes Schwellenfach) und Mikrofonposition 2 (Fehlstelle 2) bei Fahrzeugüberfahrten in unterschiedlicher Geschwindigkeit mit der Lok	64
A.1 Montierter Achslagerbeschleunigungssensor an der Rangierlok	i
A.2 Skizze zur Messdurchführung bei der TDR-Messung für drei benachbarte Schwellenfächer	iii
A.3 Messaufbau der Beschleunigungsaufnehmer zum Messen der vertikalen TDR am rechten Gleis	iv
A.4 Streuung der an benachbarten Schwellenfächern gemessenen vertikalen TDRs	v
A.5 Vergleich der in positive und negative Fahrtrichtung gemessenen Terzbandspektren der vertikalen TDRs	vi
A.6 Messaufbau für die Vorbeifahrtmessungen am linken Gleis	vii
A.7 Mikrofonposition für Luftschallmessungen nach DIN EN ISO 3095:2014 [16] an Fehlstelle 2	vii
A.8 Lichtschranken zur Zuggeschwindigkeitsmessung	viii
A.9 BDS bei Überfahrten mit dem RailDriVe bei durchschnittlich 29,5 km/h in positiver Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 1 und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach	x
A.10 BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 24,1 km/h in positiver Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 1 und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach	xi
A.11 BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 29,5 km/h in positiver Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 2 und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach	xii
A.12 BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 24,1 km/h in positiver Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 2 und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach	xiii
A.13 Radioaufzeichnung der Lok während der Vorbeifahrtmessungen im Ursprungsformat (oben) und nach Signalbearbeitung (unten)	xiv
A.14 Reproduzierbarkeitstest der Radrauheitsmessungen	xv
A.16 Gemittelte Rauheitspegel für die beiden rechten Räder des RailDriVe	xvii
A.17 Lauffläche der Zugräder auf der Schiene	xviii
A.15 Messspuren der Schienenrauheit	xix
A.18 Synchronisierte Zeitdaten der ABA-Messungen (links und rechts) mit den BAMessungen (F1, F5 und R1), gemessen mit dem RailDriVe in positiver Fahrtrichtung	xx
A.19 Spektrale Leistungsdichte der ABA-Messungen gemessen mit dem RailDriVe in positiver Fahrtrichtung	xxi

Tabellenverzeichnis

3.1	Gleisparameter	14
3.2	Gemessene Veränderung der Schiene im Vergleich mit einer neuwertigen Schiene .	14
3.3	Maße der beiden verbauten Schwellenarten	15
3.4	Fehlstellen am Gleis im relevanten Messbereich	17
3.5	Schienenseitiges Messequipment	19
5.1	Positionen der Beschleunigungsaufnehmer bei der TDR-Messung	31
5.2	Positionen der geklebten Beschleunigungsaufnehmer um die Referenzschwelle für die Messung des Schienenschwingverhaltens bei Zugvorbeifahrten	33
5.3	Positionen der Beschleunigungsaufnehmer an den untersuchten Fehlstellen	34
6.1	Äquivalente A-bewertete Dauerschallpegel bei Fahrzeugüberfahrten	62
A.1	Übersicht der schienenseitigen Messungen mit und ohne Zugvorbeifahrten	ii
A.2	Geschwindigkeit und Fahrtrichtung der gemessenen Fahrzeugüberfahrten	ix
A.3	Rauheitsmessgeräte	xv
A.4	Ergebnisse des Reproduzierbarkeitstests der Radrauheitsmessungen	xvi
A.5	Messspuren bei den Schienenrauheitsmessungen	xvi
A.6	Messspuren bei den Radrauheitsmessungen	xvi

Abkürzungsverzeichnis

ABA	=	Achslager-Beschleunigungssensoren
BA	=	Beschleunigungsaufnehmer
BDS	=	Beschleunigungsdichtespektrum
DFT	=	Diskrete Fourier Transformation
DLR	=	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DR	=	<i>Decay Rate</i> , Abklingrate
EBO	=	Eisenbahnbauordnung
FFT	=	<i>Fast Fourier Transformation</i> , schnelle Fourier-Transformation
FRF	=	<i>Frequency Response Function</i> , frequenzabhängige Übertragungsfunktion
GNSS	=	Satellitennavigationsempfänger
GPS	=	<i>Global Positioning System</i> , globales Positionsbestimmungssystem
IMU	=	<i>Inertial Measurement Unit</i> , Inertialmesseinheit
ISTA	=	Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik der TU Berlin
PSD	=	<i>Power Spectral Density</i> , spektrale Leistungsdichte
RMS	=	<i>Root Mean Square</i> , quadratisches Mittel
TDR	=	<i>Track Decay Rate</i> , Gleisabklingrate
TU	=	Technische Universität
UKW	=	Ultrakurzwellen

1 Einleitung

Zugverkehr verursacht je nach Fern- oder Nahverkehr nur 20–30 % der Emissionen von PKWs laut Umweltbundesamt [1]. Während der Corona-bedingten Maßnahmen zur Eindämmung der Pandemie ab April 2020 und dem daraus resultierenden starken Einbruch der Fahrten auf täglichen Arbeitswegen und der Anzahl an durchgeführten Dienstreisen lagen die weltweiten CO₂-Emissionen täglich um 17 Millionen Tonnen unter denen von 2019. Um eine langfristige Reduzierung der CO₂-Emissionen zu erreichen, ist jedoch ein globales Umdenken und unter anderem die verstärkte Nutzung von klimafreundlichen Transportoptionen unabdingbar. Daher ist ein weiterer Ausbau des Schienenverkehrs in den nächsten Jahren ein wichtiger Bestandteil klimafreundlichen Transportes. Da die Geräuschemissionen von Zügen jedoch gerade in Wohngebieten als sehr störend empfunden werden, ist eine weitere Reduktion des Lärms notwendig. Nur so kann sichergestellt werden, dass Anwohnende einem Ausbau von Streckennetzen sowie höheren Zugtaktungen wohlgesonnen sind. Aktuell gibt es in Deutschland zum Beispiel Proteste von Anwohnenden gegen den Bau des Ceneri-Basistunnels durch die Alpen, welcher die Reduzierung des Warentransports mit LKWs bewirken würde, aber den Schienenverkehr durch Wohngebiete führt. [2]

Es ist also eine Lärmreduzierung des Schienenverkehrs notwendig. Das Rollgeräusch dominiert die Schallemissionen von Schienenfahrzeugen für die am häufigsten genutzten Geschwindigkeiten [3, S.8]. Deshalb kann eine gezielte Reduzierung von lästigen Schallemissionen nur über eine genaue Kenntnis der Einflussgrößen auf das Rollgeräusch erreicht werden.

Wichtige Veröffentlichungen zum Thema Schienenverkehrslärm sind beispielsweise [3], [4], [5] und [6]. Das Thema bleibt bis heute ein sehr aktuelles Forschungsthema. So wurden unterschiedliche Modelle für den Rad-Schiene-Kontakt entwickelt (siehe z. B. [7], [8]), die noch immer teilweise validiert und erweitert werden. Nur über diese Grundlagenforschung kann ein systematisches Verständnis der dort wirkenden Wechselwirkungen erhalten werden. Ziel der Untersuchungen ist es dabei eine gezielte Lärmkontrolle zu gewährleisten.

Messungen der Rollgeräuschabstrahlung im Luftschall sowie der Schienen- und Achslagerbeschleunigungen können dabei helfen, Rückschlüsse auf eventuelle Fehlstellen zu machen, da diese einen signifikanten Einfluss auf das Rollgeräusch von Zügen haben [9]. Eine genaue Kenntnis des Rollgeräusches von Zügen kann so helfen das von der Norm abweichende Verhalten an diskreten fehlerhaften Gleisstellen zu quantifizieren und zu bewerten.

Einige Maßnahmen zur Schallreduktion haben es bereits in den regulären Bahnbetrieb geschafft, so will die Deutsche Bahn bis Ende 2020 nur noch leise Güterwagen mit sogenannten Flüsterbremsen einsetzen [10]. Eine entsprechende gesetzliche Vorschrift gilt ab 2021 [11]. Diese Bremsen reduzieren das Rollgeräusch um bis zu 10 dB(A).

Aktuelle Forschungsthemen sind beispielsweise die Anomaliedetektion am Gleis mittels Regelzügen. Diese wird bereits in der Praxis erprobt. Hierzu werden unter anderem vom DLR Messsysteme zur Erfassung der dynamischen Fahrzeugreaktionen mittels breitbandiger triaxia-

ler Achslagerbeschleunigungssensoren (ABA), Satellitennavigationsempfänger (GNSS) und Inertialmesseinheit (IMU) zur Messung der Beschleunigungen und Drehraten verwendet (siehe [12] und [13]). Es wurde unter anderem ein portables System zur kurzfristigen Installation mit dem Ziel der gleisgenauen Georeferenzierung der erhobenen Messdaten und der daraus folgenden Ableitung von Informationen zum Schienenzustand entwickelt. Die Daten dienen der Detektion von einzelnen Schienendefekten. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass die Größe der Schienensingularität anhand der Größe der Störkomponente bestimmt werden kann. Ähnliche Ansätze wurden auch in dem EU-Projekt *Quiet tracks for Sustainable Railway Infrastructure* [14] verfolgt. Hierbei war das Ziel der Untersuchungen, Schienenabschnitte nach Stellen für Instandhaltungsmaßnahmen mittels einer Quantifizierung der Lärmabstrahlung zu untersuchen. Zusätzlich wurden unterschiedliche schienenbasierte Methoden zur Reduzierung der Lärmemissionen des Zugverkehrs verglichen.

In der vorliegenden Arbeit soll die Beeinflussung des Rollgeräusches durch Fehlstellen an der Schiene untersucht werden. Hierzu wurden Messdaten im Rahmen einer Messreihe am Gleisnetz des Braunschweiger Binnenhafens in Zusammenarbeit der TU Berlin (Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik) und dem DLR (Institut für Verkehrssystemtechnik) im Juni 2020 erhoben.

Es wurden Messungen zur Charakterisierung eines guten Schienenabschnitts und von Fehlstellen an der Schiene sowie von Beschleunigungsdaten der Schiene und der Zugachse bei Zugvorbeifahrten durchgeführt. Von einer Kombination der schienen- und fahrzeugseitigen Messergebnisse beider Methodiken wird sich eine genauere Erkenntnis des Einflusses von Fehlstellen am Gleis auf die Körperschallausbreitung in der Schiene erhofft. Dieses Wissen kann sowohl bei der Instandhaltung von Gleisanlagen von Vorteil sein als auch bei der gezielten Reduktion von Lärmemissionen helfen.

Im Folgenden werden zunächst die theoretischen Grundlagen des Rad-Schiene-Kontaktes und der Rollgeräuschenstehung sowie die Definitionen verwendeter mechanischer Eigenschaften zur Beschreibung der Schiene erläutert. Es folgt die Erklärung des gleisseitigen und fahrzeugseitigen Versuchsaufbaus sowie der verwendeten Methoden unter Berücksichtigung der Charakterisierung des Schienenabschnitts. Insbesondere wird hier die Synchronisierung der Messsysteme vorgestellt und systematisch auf die Durchführung der Messungen eingegangen. Im Anschluss werden die schienenseitigen Messergebnisse zur Charakterisierung des Gleises sowie die Ergebnisse der Vorbeifahrtmessungen erläutert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hierbei in der Unterscheidung der Ergebnisse aus einem guten Gleisabschnitt und den Messungen an Fehlstellen an der Schiene.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird zunächst auf die für das Verständnis der angewandten Methoden notwendige Theorie eingegangen. Zuerst wird der Rad-Schiene-Kontakt erläutert sowie die resultierende Schallabstrahlung in Form von Rollgeräuschen bei fahrenden Zügen. Besonders wird hier auf die verschiedenen Parameter, wie die Rauheit und das Abklingverhalten der Schiene, eingegangen. Anschließend werden die Messgrößen und Methoden zur Messung von Schienenvibrationen vorgestellt.

2.1 Rollgeräusche bei Schienenfahrzeugen

Die Schallemissionen von Schienenfahrzeugen werden im Wesentlichen durch Aggregatgeräusche (Geschwindigkeitsbereich $v < \text{ca. } 60 \text{ km/h}$), das Rollgeräusch (Geschwindigkeitsbereich $\text{ca. } 60 \text{ km/h} < v < 300 \text{ km/h}$) und aerodynamische Geräusche (Geschwindigkeitsbereich $v > 300 \text{ km/h}$) bestimmt [15, S. 6]. Da das Rollgeräusch für die am häufigsten genutzten Geschwindigkeiten dominiert, ist dieses von besonderem Interesse bei der Lärmbetrachtung von Zügen [3, S.8]. Im Weiteren wird sich daher auf die Betrachtung des Rollgeräusches beschränkt.

Für Messungen der Geräuschemissionen von spurgebundenen Fahrzeugen wird die DIN EN 3095:2014 [16] verwendet. Die dortigen Regelungen sind relativ breit anwendbar, so können die Ergebnisse beispielsweise genutzt werden, um die von einem Zug abgestrahlten Geräusche zu beschreiben, grundlegende Daten über Züge zu erheben oder unterschiedliche Fahrzeuge auf einem bestimmten Gleisabschnitt zu vergleichen. Die grundlegende zu bestimmende Messgröße nach [16] ist der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,T}$ unter Berücksichtigung der Zuggeschwindigkeiten und der Vorbeifahrzeit T . Er dient der Quantifizierung von Schallemissionen und wird berechnet mit: [17, S.10]

$$L_{pAeq,T} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \text{ dB} \quad (2.1)$$

Hierbei bezeichnet p_A den A-bewerteten Schalldruck in Pascal. Der Referenzwert p_0 hat einen Wert von $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, dies entspricht der Hörschwelle.

Das Rollgeräusch ist geschwindigkeitsabhängig und nimmt mit höheren Zuggeschwindigkeiten zu. Für die Abhängigkeit des Rollgeräusches von der Geschwindigkeit v gilt, dass

$$L_P = L_{P0} + N \cdot \log_{10} \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad (2.2)$$

ist, wobei N mittels linearer Regression bestimmt wird. Diese Konstante nimmt Werte zwischen 25 und 35 an. Der Schalldruckpegel bei der Referenzgeschwindigkeit v_0 wird mit

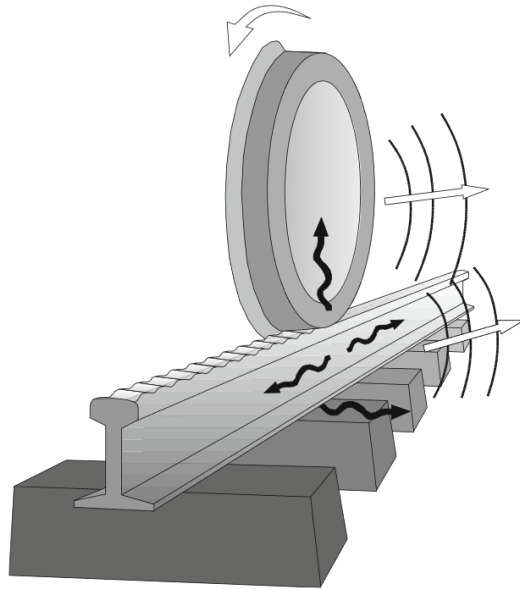


Abbildung 2.1: Illustration der Mechanismen in der Rollgeräuscentstehung [3, S.7]

L_{P0} bezeichnet. [9] [3, S.13]

Rollgeräusche entstehen durch die Interaktion von Rad und Schiene bei Überfahrten. Durch kleine Rauheiten auf der Lauffläche, parametrische Anregung durch die Lagerung und variierende Steifigkeit der Schiene und Kopplungsmechanismen zwischen der Schienen- und Radantwort sowie die Kontaktkraft werden beide Teilkomponenten in Schwingung versetzt [3, S.11]. Dies ist exemplarisch in Abbildung 2.1 skizziert.

Durch die entstandene Welle mit einer Wellenlänge λ und einer Geschwindigkeit v wird eine sinusoidale Schwingung mit der Frequenz

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2.3)$$

generiert. Die resultierenden hochfrequenten Schwingungen breiten sich sowohl in der Schiene wie auch über die Räder in dem Fahrzeug aus und verursachen Schallemissionen. [3, S.11] Zwischen dem Rad und der Schiene, wie zu sehen in Abbildung 2.1, bildet sich eine Kontaktfläche aus, deren Größe mit der Last durch das zum Rad gehörende Fahrzeug zunimmt. Die entsprechende Beziehung von Rad und Schiene im Kontakt ist nicht linear.[3, S.141]

Der Rad-Schiene-Kontakt wird zumeist über die Hertzsche Kontaktkraft modelliert. Diese beschreibt den Kontakt zwischen elastischen Körpern mit leicht gekrümmter Oberfläche, der sich in Form einer ellipsenförmigen Kontaktfläche herausbildet. Die Hertzsche Kontaktkraft kann hier zur Beschreibung der Rad-Schiene-Kontaktfläche und der resultierenden charakteristischen Spannungsverteilung im Kontakt verwendet werden. Ausführlich wird sie in [18] vorgestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird vor allem der Frequenzbereich bis 2 kHz betrachtet. In diesem

Bereich ist der Einfluss des Rades auf das Rollgeräusch vernachlässigbar [19].

Im Allgemeinen wird das Rollgeräusch von durch Rauheiten angeregten Gleis- und Radschwingungen dominiert. Als kritische Parameter für deren Entstehung benennen Li, Thompson und Toward die kombinierte Rauheit von Rad und Schiene, die Gleisabklingrate (*track decay rate*, TDR) und weitere weniger dominante dynamische Parameter. [20]

Im Folgenden wird auf diese dominanten Einflussparameter in der Rollgeräuschenstehung im Detail eingegangen.

2.1.1 Schienen- und Radrauheiten

Das Rauheitsprofil auf der Rad- und Schienenoberfläche ist willkürlich und verändert sich mit der Zeit durch Beanspruchungen und Instandhaltungsmaßnahmen wie Schienenschleifen [20]. Die akustische Rauheit r charakterisiert Unebenheiten auf den Laufflächen von Schiene (Schienerauheit) oder Rad (Radrauheit), welche beide Kontaktpartner zu Schwingungen anregen können. Sie ist nach DIN EN 15610:2009 [21] als Variation der Fahrfläche in ihrer Höhe bezogen auf die Längskoordinate der Fahrfläche definiert. Hierbei werden Höhenvariationen in der für die Anregung des Rollgeräusches relevanten Größenordnung berücksichtigt.

Zur Angabe der Rauheit wird oft ein Rauheitsspektrum $\tilde{r}(\lambda)$, also die Amplitude der akustischen Rauheit als Funktion der Wellenlänge, verwendet. Sie wird in μm angegeben. [21]

Der Rauheitspegel L_r berechnet sich aus dem Effektivwert des Rauheitsverlaufs r_{RMS} über dem Messabschnitt und dem Bezugswert der Rauheit $r_0 = 1 \mu\text{m}$ und wird als Terzspektrum angegeben: [15]

$$L_r = 10 \log_{10} \left(\frac{r_{\text{RMS}}^2}{r_0^2} \right) \quad (2.4)$$

Die kombinierte Rauheit, welche das Rollgeräusch anregt, setzt sich aus dem Pegel der Schienerauheit, dem Pegel der Radrauheit und dem Kontaktfilter zusammen. Dieser Filter dient der vereinfachten Beschreibung der Rad-Schiene-Wechselwirkungen und beschreibt den Zusammenhang der akustischen Rauheiten auf den Laufflächen der Schiene mit der Schwingungsanregung [22]. Das Ergebnis ist eine effektive Rauheit.

Unter normalen Bedingungen ist ein linearer Zusammenhang zwischen dem verursachten Rollgeräusch und dem effektiven Rauheitspegel beobachtbar [9]. Um Schallemissionen möglichst gering zu halten, muss also auf glatte Kontaktflächen sowohl des Rades als auch der Schiene geachtet werden [23].

Die Bestimmungen zum Messen der direkten Schienerauheit sind in der DIN EN 15610:2009 [21] festgelegt, welche auch relevant für die DIN EN ISO 3095:2014 [16] und DIN EN 3381:2019 [24] ist. Die DIN EN ISO 3095[16] wiederum legt die zu messenden longitudinalen und lateralen Positionen sowie die notwendigen Schritte der Datenverarbeitung fest. Hier werden außerdem Grenzkurven der Rauheit definiert.

Direkte Messmethoden der Schienerauheiten beinhalten einen Eingriff in den Zugverkehr, da die Gleise in dieser Zeit nicht genutzt werden können. Für eine Messung der Radrauheiten wiederum muss das Fahrzeug in einer Werkstatt aufgebockt werden. Es bieten sich an befahrenen Gleisstellen indirekte Methoden zur Bestimmung der effektiven Rauheit an. Diese werden beispielsweise in [9] vorgestellt, die entsprechenden Messverfahren sind in der DIN

CEN TR 16891/DIN SPEC 38451:2017 [25] festgelegt.

Um den Gleiszustand anhand der Rauheitsdaten zu klassifizieren, kann ein Rauheits-Einzahlwert L_{λ, C_A} verwendet werden. Nach [22, S.20] können mit diesem drei Kategorien an Schienen unterschieden werden. Diese sind:

$$\text{Kategorie} = \begin{cases} \text{glatt:} & L_{\lambda, C_A} < 4 \text{ dB} \\ \text{durchschnittlich:} & 4 \text{ dB} \leq L_{\lambda, C_A} \leq 10 \text{ dB} \\ \text{schlecht:} & L_{\lambda, C_A} > 10 \text{ dB} \end{cases} \quad (2.5)$$

Unter Berücksichtigung des gemessenen Rauheitsspektrums $R(\lambda)$, einem Korrekturspektrum $\Lambda(\lambda)$, einem Kontaktfilter $C(\lambda)$ und dem A-Bewertungspegel für Schalldrucksignale $A_{\text{bew}}(f(\lambda, v))$ gilt:

$$L_{\lambda, C_A} = 10 \cdot \log_{10} \sum_{\lambda=20\text{cm}}^{0,4\text{cm}} 10^{\frac{1}{10}(R(\lambda)+\Lambda(\lambda)+C(\lambda)+A_{\text{bew}}(f(\lambda, v)))} \quad (2.6)$$

mit:

$$\Lambda(\lambda) = -25 \cdot \log_{10} \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad (2.7)$$

wobei $\lambda_0 = 5 \text{ cm}$ ist. Für den Kontaktfilter gilt wiederum:

$$C(\lambda) = \begin{cases} 0 & \text{für } \lambda \geq 10^{0,85} \\ 10 \cdot \log_{10}(\lambda) - 8,5 & \text{für } 10^{0,35} < \lambda < 10^{0,85} \\ 20 \cdot \log_{10}(\lambda) - 12 & \text{für } \lambda \leq 10^{0,35} \end{cases} \quad (2.8)$$

Eine solche Bewertung mit Hilfe eines Einzahlwertes vernachlässigt zwar die spektrale Auflösung des Signals, kann jedoch für den Vergleich unterschiedlicher Gleisanlagen hilfreich sein. [22, S.20]

2.1.2 Gleisabklingrate

Die Schwingungsantwort (Impulsantwort) des Oberbaus auf Schwingungsanregung durch das Abrollen der Räder eines Schienenfahrzeuges auf dem Gleis ist bestimmend für den Beitrag des Gleises zum Rollgeräusch. Die Gleisabklingrate ist eine wichtige Größe bei der Abschätzung des dynamischen Verhaltens des Gleises und ein weiterer Hauptparameter der Rollgeräuschentstehung. Die TDR bezeichnet dabei die Dämpfungsrate der Schwingungsamplitude sowohl der vertikalen als auch der transversalen Biegewelle in der Schiene in Schienenlängsrichtung. Sie liefert also wichtige Informationen über die Lärmemissionen der Schiene. [20]

Die Methoden zur Messung der TDR am Gleis sind in der DIN EN 15461:2011 [26] standardisiert. Hierzu werden Messungen der Übertragungsfunktionen durchgeführt. Es wird die Antwort auf Hammerimpulse an festgelegten Positionen mittels Beschleunigungsaufnehmern gemessen. [27]

Bei der Berechnung der Gleisabklingrate nach DIN EN 15461:2011 [26] gilt die Annahme, dass die Amplitude der Vibration der Schiene ungefähr exponential mit der Entfernung auf

der Schiene abklingt. Je besser das Gleis dämpft, desto schneller nimmt die Schienen vibration ab.

Zunächst werden aus den Messdaten hierzu Akzeleranzen berechnet und diese als Terzspektren angegeben. Die Abklingraten DR in jedem Terzband werden nach [26, S.13] wie folgt berechnet:

$$DR = \frac{4,343}{\sum_{n=0}^{n_{max}} \frac{|A(x_n)|^2}{|A(x_0)|^2} \cdot (x_0 - x_n)} \quad (2.9)$$

wobei x_n eine Reihe von Punkten ist, an denen die Transfer-Akzeleranz erhoben wird. Diese Punkte entsprechen den in Abbildung A.2 gekennzeichneten Messpunkten der TDR. Hierbei gilt, dass n_{max} zu dem Punkt in maximalem Messabstand x_{max} gehört.

Auf die Details der Durchführung von TDR-Messungen wird genauer im Kapitel 5.6 eingegangen.

Es gibt auch eine indirekte Methode zur Bestimmung der Abklingrate aus Zugvorbeifahrtsmessungen. Dieses fahrwegfeste, indirekte Verfahren zur Bestimmung der Gleisabklingrate mittels Beschleunigungsaufnehmern an der Schiene über Messungen der lateralen Beschleunigungen am Schienenkopf sowie der vertikalen Beschleunigungen am Schienenfuß wird in [28] und [9] genauer erläutert. Auch für diese Methode existiert eine Standardisierung nach DIN CEN/TR 16891:2017 [25]. Mit der indirekten Methode bestimmte Abklingraten weichen um höchstens 5 dB/m von den Ergebnissen der direkten Methode nach DIN EN 15461:2011 [26] ab.

Um die TDRs unterschiedlicher Gleisanlagen vergleichen zu können, gibt es auch hier Modelle, wie zum Beispiel die Entwicklung eines TDR Einzahlwertes aus den vertikalen Gleisabklingraten, wie vorgeschlagen in [29]. Da diese jedoch die spektrale Auflösung der TDR nicht berücksichtigt, ist ihre Verwendung bisher nicht verbreitet.

2.1.3 Steifigkeit und Dämpfung der Schienenlagerung

Neben der Schienenrauheit verändern sich mit der Zeit auch die Steifigkeit des Schotters, die Steifigkeit der Zwischenlagen und die Haltekraft der Klammern am Schienenfuß durch die Beanspruchungen bei Zugüberfahrten und Witterungseinflüsse. Auch diese Größen beeinflussen die Schallemissionen von Zügen. Wie Venghaus unterstreicht, wäre mit Hilfe einer angepassten Systematik bei den Instandhaltungsarbeiten an der Trasse eine Steigerung der Lärminderungspotentiale und in einigen Fällen sogar eine langfristige Kosteneinsparung möglich. [23]

Ziel einer Steifigkeitsmessung an der Schiene ist es, die Federeigenschaften des Oberbaus abzubilden. Dazu werden zumeist Impulsantworten der Struktur vertikal über der Schwelle bzw. in der Schwellenmitte gemessen. Hierbei geht es unter anderem darum, Unterschiede zwischen verschiedenen Schwellen zu charakterisieren, da die Feder-/ Dämpfereigenschaften des Systems bestehend aus verschiedenen Teilkomponenten Parameter sind, die nur schwer angegeben werden können.

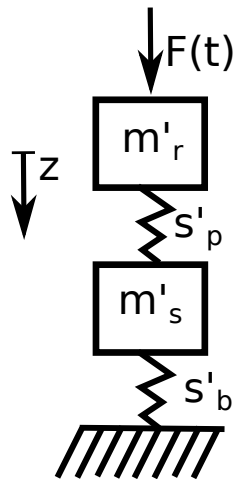


Abbildung 2.2: Zwei-Massen-Schwinger als mechanisches Ersatzmodell für ein Gleis mit Schotter-Oberbau (eigene Abbildung nach [31, S.6])

2.2 Frequenzverhalten des Gleissystems

Das Verhalten des Gleissystems bei Zugüberfahrten wird durch den Kontakt der Fahrzeugräder und der Schiene bestimmt. Der Körperschall entsteht im Rad-Schiene-Kontaktpunkt und breitet sich von dort sowohl im Fahrzeug als auch in der Schiene aus. [15, S.5]

Bei der Betrachtung der Körperschallausbreitung in der Schiene helfen mechanische Modelle. Ein relativ gutes mechanisches Ersatzmodell für ein Gleis mit Schotter-Oberbau ist ein zweifach elastisch gelagerter unendlicher Biegebalken. Die Grundlagen dieser Modellbildung, also die elementare Balkentheorie sowie insbesondere die Biegetheorien nach Euler-Bernoulli und Timoshenko sind in [30] zu finden. Entsprechende Simulationen für den Schienenverkehr sind beispielsweise [3] zu entnehmen.

Bereits bei der Approximation durch einen Zwei-Massen-Schwinger bilden sich viele für die Schallemission relevante strukturdynamische Effekte aus. Dieses Modell ist in Abbildung 2.2 skizziert. Im tief- und hochfrequenten Bereich bietet sich sogar ein jeweils unterschiedlicher Ein-Massen-Schwinger als Modell an [31, S.5]. Die Masse m'_r entspricht der längenspezifischen Schienenmasse, die Masse m'_s der längenspezifischen Schwellenmasse, während s'_p und s'_b für die längenspezifischen Stützpunkt- bzw. Schottersteifigkeiten stehen. Das System erfährt eine zeitabhängige Kraftanregung $F(t)$. Die beiden Eigenfrequenzen des Systems aus Abbildung 2.2 entsprechen den Frequenzen, in denen die Wellenausbreitung einsetzt. Die in der akustischen Gleisdynamik relevanten Frequenzen liegen bei circa 270 Hz (vertikal), dies ist die Resonanz des Gleisrostes auf dem Schotter, und bei circa 700 Hz, wo die Resonanz der Schiene auf der Zwischenlagen-Steifigkeit liegt. Zwischen diesen beiden Frequenzen tritt ein Tilgerpunkt bzw. eine Antiresonanz des Systems aus Abbildung 2.2 auf. Hier bildet sich die Schwellenschwingung, eingebunden in die Stützpunkt- und Schotter-Steifigkeit aus. Sie liegt bei circa 360 Hz, breitet sich aber oft breitbandig aus. [31, S.5-8] [20]

Schienen werden diskret auf Schwellen gelagert. Ein Einfluss auf die Wellenausbreitung

durch die Lagerung in periodischen Abständen ist die *pinned-pinned*-Frequenz. Bei dieser Frequenz entspricht etwa die halbe Biegewellenlänge in der Schiene dem Schwellenabstand. Dies bedeutet, dass das System der periodisch gelagerten Schiene eine Resonanz hat. Die Resonanz ist somit vor allem von dem Schwellenabstand und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle in der Schiene abhängig.[3, S.31]

2.3 Fehlstellen an der Schiene

Durch die Beanspruchungen der Schiene, Witterungsbedingungen sowie Fertigungsfehler können unterschiedliche Fehlstellen an einer Schiene auftreten. Im Weiteren soll ein kurzer Überblick über häufige Fehlstellenarten und deren Einflüsse auf die Rollgeräuschenstehung gegeben werden.

Schienenfehler, die tieffrequente Schwingungen hervorrufen, sind vor allem für den Komfort von eventuellen Passagieren unangenehm und können die Schienenfahrzeuge schädigen. Hierbei handelt es sich meistens um lagerungsbedingte Fehlstellen an Schienen wie Gleislagefehler bei fehlendem Schotter (Hohllagen der Schiene), Unterschiede der Klemmvorspannung oder Höhenlageunterschiede. Diese haben typischerweise Wellenlängen von über 3 m. Deshalb führen sie auch bei sehr hohen Überfahrtsgeschwindigkeiten nach Gleichung 2.3 zu Frequenzen $f < 10$ Hz und sind daher akustisch irrelevant. [31, S.11] [32]

Schienenfehler, die Anregungen im Frequenzbereich ab 40 bis über 2000 Hz verursachen, sind wiederum akustisch relevant. Diese sind oft relativ breitbandig ausgeprägt, es treten aber auch gelegentlich monofrequente Anregungen auf. Letztere sind zum Beispiel auf Schienenriffel oder kurzfristig auftretende Phänomene direkt nach Schleifvorgängen zurückzuführen. [33]

Häufige Oberflächenfehler an der Schiene sind zum Beispiel so genannte *Head Checks*, feine Oberflächenrisse [34]. Weitere Ermüdungserscheinungen der Schiene sind beispielsweise periodische Rissnester, so genannte Belgrospis, oder auch Einsenkungen auf dem Schienenkopf, die als *Squats* bezeichnet werden. Auf deren Auswirkungen und Detektion wird genauer in [35], [36] und [37] eingegangen.

Eine allgemeine Übersicht über die bereits genannten sowie weitere häufige Schienenfehler mit jeweiligen Methoden zur Erkennung, Bewertung und Behandlung dieser kann [38] entnommen werden.

In dieser Arbeit wird sich auf zwei Arten von Fehlstellen am Gleis fokussiert. Diese sind zum einen Schienenstöße, also der Bereich, in dem zwei Schienenenden im Gleisbau aneinander grenzen, und zum anderen Lochbohrungen im Schienensteg.

Lochbohrungen und Schienenstöße treten an allen Gleisanlagen in regelmäßigen Abständen auf, unter anderem, da einzelne Schienen aus fertigungsbedingten und transporttechnischen Gründen eine finite Länge (früher maximal 30 m, inzwischen bis zu 250 m) haben. Die Schienenenden werden meistens mit Schweißverbindungen aneinander befestigt. Die Verarbeitung der Schweißnähte beeinflusst maßgeblich die Schallausbreitung. So können einzelne Schienenstöße nach [32, S.16] bei Überfahrtsmessungen mit ABA-Sensoren eindeutig identifiziert werden, da sie Peaks im ABA-Signal produzieren. Geschweißte Schienenstöße sind im Bereich zwischen 0 und 400 Hz auf einer Breite von etwa 0,2 s im Signal sichtbar, je nach Zustand können diese

Peaks aber auch in Frequenzen von bis zu 900 Hz erkennbar sein.[39]

2.4 Körperschallmessungen im Schienenverkehr

Die Messung von Körperschalldaten im Zugverkehr erfolgt mehrheitlich anhand von Beschleunigungsmessungen an Gleisen oder Fahrzeugen mittels Beschleunigungsaufnehmern.

Beschleunigungen \vec{a} lassen sich durch Integrieren nach der Zeit t in andere Bewegungsgrößen wie die Schnelle \vec{v} oder die Auslenkung $\vec{\xi}$ umrechnen.

Das Verhältnis der komplexen Kraft \underline{F} und der komplexen Schnelle \underline{v} an der Stelle der Kraftmessung ist die mechanische komplexe Punktimpedanz \underline{Z} . Diese ist somit als

$$\underline{Z} = \frac{\underline{F}}{\underline{v}} \quad (2.10)$$

definiert. [40, S.24] Sie gibt an, wie gut die Struktur sich durch Schwingungen anregen lässt. Man unterscheidet zwischen der (Punkt-)Eingangsimpedanz, bei der Kraft und Schnelle am selben Ort gemessen werden, und der Transferimpedanz, bei der Kraft und Schnelle an zwei verschiedenen Stellen auf der Struktur gemessen werden. Der Kehrwert der Impedanz wird als Mobilität (*mobility*), Admittanz oder auch Beweglichkeit bezeichnet.

Ein weiterer relevanter mechanischer Parameter ist die dynamische Masse m_{dyn} , die aus dem Verhältnis von Kraft und Beschleunigung gebildet wird. Im Weiteren wird insbesondere ihr Kehrwert, die so genannte Akzeleranz $\underline{a_{cc}}$ oder Trägheit, Anwendung finden. Sie ist als

$$\underline{a_{cc}} = \frac{\underline{a}}{\underline{F}} \quad (2.11)$$

definiert. [41, S. 428 ff.] Die Akzeleranz ist also die Beschleunigung pro Krafteinheit.

Die zur Messung verwendeten Beschleunigungsaufnehmer sind Messwandler, die der Umwandlung von Beschleunigungen in elektrische Signale dienen. Im Körperschall werden oftmals piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer verwendet. Diese können die Beschleunigungen einer Struktur über piezoelektrische Kristalle, die bei einer gerichteten Verformung ihres Atomgitters durch eine dynamische Kraft nach außen ableitbare elektrische Ladungsverschiebungen erzeugen, umwandeln. [42, S.8]

Ein besonderer Fokus ist bei der Montage von Beschleunigungsaufnehmern an die Kopplung mit der Struktur, an der gemessen werden soll, zu legen. Bei Messungen im hochfrequenten Bereich ist so auf eine mechanisch möglichst steife Befestigung des Sensors am Messobjekt zu achten. Dies kann beispielsweise mittels eines Adapterplättchens und Kleber realisiert werden. Weiterhin kann der Aufnehmer durch äußere Einflüsse wie die Temperatur, Feuchtigkeit, elektromagnetische Felder oder Magnetfelder beeinflusst werden. Letztere gilt es während einer Messung mittels Schirmung zu reduzieren, während die Wetterbedingungen möglichst konstant gehalten werden sollten. [41, S.441-482]

Tieferführende Informationen zum piezoelektrischen Effekt, den verwendeten Materialien, Bauformen sowie den Übertragungseigenschaften von Beschleunigungssensoren und dem Einfluss der Signalaufbereitung sind z. B. [42] oder [41, S.441-482] zu entnehmen.

Insbesondere die Ergebnisse von Messungen der Achslagerbeschleunigungen sind zusätzlich hochgradig geschwindigkeitsabhängig. Am besten sind die erzielten Ergebnisse für sehr niedrige Fahrgeschwindigkeiten unter 40 km/h, also unterhalb der regulären Zuggeschwindigkeiten auswertbar. [36]

Auch hat die Position eines an der Schiene befestigten Beschleunigungsaufnehmers einen Einfluss auf die Messergebnisse. Die Auswirkungen der Position werden bezogen auf indirekte Rauheits- und TDR-Messungen an Schienen z. B. in [25, S.43-48] vorgestellt.

Eine typische Anwendung von Beschleunigungsmessungen ist die Impulsantwort. Hierzu werden Impulshammer verwendet, die genutzt werden, um Strukturen mittels mechanischer Kraftimpulse anzuregen. Impulshammer sind in diesem Fall Hammer mit integrierten Kraftsensoren, die die eingeleitete Kraft messen. Die Schwingungsantwort der Struktur wird mit Beschleunigungsaufnehmern erfasst. Über das Verhältnis von eingeleiteter Kraft und Anregung lassen sich Strukturgrößen ermitteln.[41, S.493-497]

3 Messungen an der Braunschweiger Hafenbahn

Die verwendeten Messdaten wurden im Rahmen einer dreitägigen Messreihe am Braunschweiger Binnenhafen im Juni 2020 erhoben.

Dabei wurden Messungen zur Erhebung von Beschleunigungsdaten der Schiene und der Zugachse bei Zugvorbeifahrten durchgeführt. Für die Vorbeifahrten wurden eine Rangierlokomotive und ein Zweiwegefahrzeug verwendet. Ergänzend wurden Daten für die Charakterisierung der Eigenschaften der Schiene (Abklingrate, Steifigkeit, Rauheit, Schwellenabstände) gemessen und Rauheitsmessungen an den Rädern des Zweiwegefahrzeugs durchgeführt. Zusätzlich zu den Körperschallmessungen wurden Luftschallmessungen an zwei Positionen neben dem Gleisbett vorgenommen.

3.1 Messort

Die Messungen wurden an einem ebenerdigen Gleisabschnitt nahe des Braunschweiger Hafens durchgeführt. Es handelt sich um ein Gleisstück mit drei parallelen Gleisen. Ein Kartenausschnitt mit dem Messort ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Die GPS-Koordinaten des dort eingetragenen Nullpunktes liegen bei 10.49970, 52.30931 (lat,lon). Für die Messungen wurde eine außenliegende Gleisspur gewählt, da so auf dem angrenzenden Gelände Platz zum Aufstellen der Messgeräte war. Es handelt sich um das nordöstliche Gleis in Abbildung 3.2.

Im Weiteren wird die in Abbildung 3.1 mit einem Pfeil gekennzeichnete Fahrtrichtung als positiv bezeichnet, dementsprechend ist die außenliegende Schiene der gewählten Gleisspur die rechte und die näher an den Nachbargleisen liegende Schiene die linke.

Zwischen der Schiene und dem angrenzenden Feldweg gibt es einen lockeren Bewuchs mit Bäumen und Sträuchern. Da es sich bei dem angrenzenden Gelände um einen Feldweg handelt, gibt es dort keinen Autoverkehr, was das Gelände für den Versuchsaufbau geeignet macht.



Abbildung 3.1: Prüfabschnitt am Gleis nahe des Braunschweiger Binnenhafens, die GPS-Koordinaten des Nullpunktes sind 52.309313671149795, 10.499700467600599 (lat, lon)[43]



Abbildung 3.2: Gleis am Braunschweiger Hafen in negativer Fahrtrichtung

3.2 Schienenbeschaffenheit

Das Gleis besteht aus einer Vignolschiene vom Typ S49 auf Betonschwellen. Die Schienen sind mit Schellenschrauben und Spannklemmen auf Winkelplatten befestigt. Sie sind auf Schotter gebettet und weisen diverse Fehlstellen wie Lochbohrungen und Schweißstellen in unregelmäßigen Abständen auf. Bei Voruntersuchungen mit einem Impulshammer konnten auch zwei Schwellen identifiziert werden, bei denen ein Verdacht auf Hohlschwellen besteht. Die entsprechenden Daten zum Gleis sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Schiene	Gleisbett	Schwelle	Schwellenabstand
S49	Schotter (Schotterstärke: 57 E1, Schotterbett: 0,2 m)	Beton B 70W und B 70G	0,6 m

Tabelle 3.1: Gleisparameter

Es wurde ein gut zugänglicher Gleisabschnitt als Messbereich ausgewählt. Nach Voruntersuchungen des Gleises (siehe Abschnitt 5.1) wurden die Schwellen im Messbereich ausgehend von dem in Abbildung 3.1 gekennzeichneten Nullpunkt nummeriert. Dies erfolgte sowohl in positiver als auch in negativer Fahrtrichtung.

Um den Zustand der Schiene zu dokumentieren, wurde außerdem der Schienenabrieb gemessen. Die gemessenen Maße inklusive der Fertigungsmaße [44] sind in Tabelle 3.2 zu sehen. Die Schiene ist nicht auf beiden Schienenseiten gleich stark abgerieben.

Schiene	Höhe
rechts	14,6 cm
links	14,8 cm
neue Schiene [44]	14,9 cm

Tabelle 3.2: Gemessene Veränderung der Schiene im Vergleich mit einer neuwertigen Schiene

Zur weiteren Einschätzung des Gleises wurden auch Messungen der Spurweite, also des Abstands zwischen der linken und rechten Schiene, berücksichtigt.

Im Messbereich beträgt die gemessene Spurweite im Mittel 1435,2 mm mit einem Maximalwert von 1442,5 mm, einem Minimalwert von 1429,2 mm und einer Standardabweichung von 1,7 mm. Im Vergleich mit den in der EBO nach §5 vorgeschriebenen Spurweiten sind einige der gemessenen Werte relativ gering. So sind Spurweiten unter 1430 mm nach EBO eigentlich nicht zugelassen. [45]

Schwelle B 70W - 2.4 / 98	Schwelle B 70G / 91
$L1 = 35 \text{ cm}$	$L1 = 46 \text{ cm}$
$L2 = 28 \text{ cm}$	$L2 = 37 \text{ cm}$
$D1 = 17,5 \text{ cm}$	$D1 = 17 \text{ cm}$
$D2 = 21 \text{ cm}$	$D2 = 23 \text{ cm}$
Gewicht: 284 kg	Gewicht: 304 kg

Tabelle 3.3: Maße der beiden verbauten Schwellenarten

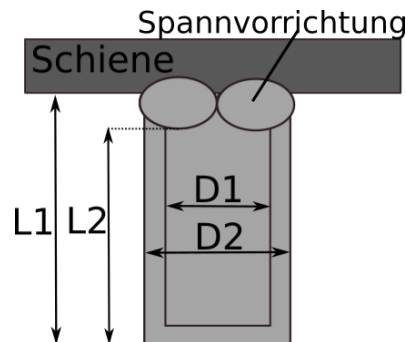


Abbildung 3.3: Skizze zur Bemaßung einer Schwellen

3.3 Fehlstellen am Gleis

In dem Messbereich tritt ein Wechsel der verbauten Schwellenart auf. Der Schwellenwechsel erfolgt von B 70W - 2.4 / 98 Schwellen auf Schwellen vom Typ B 70G / 91. In der Abbildung 3.3 ist die Skizze einer Schwellen zu sehen, mit Bezug auf diese Skizze sind die Parameter der beiden verbauten Schwellen in Tabelle 3.3 aufgelistet.

Ausführlicher wird auf den Schwellenwechsel noch in Bezug auf die Ausführungen zur Fehlstelle 2 eingegangen.

In diesem Messbereich wurden zwei Fehlstellen für weitere Untersuchungen ausgewählt:

- Fehlstelle 1 befindet sich am linken Gleis zwischen den Schwellen mit den Nummern +23 und +24. Es handelt sich um eine Kreisbohrung im Längsprofil der Schiene sowie eine danebenliegende Schweißverbindung zweier Schienenstücke, welche kurz vor der Schwelle +24 liegt (siehe Abbildung 3.4).
- Fehlstelle 2 befindet sich am rechten Gleis zwischen den Schwellen mit den Nummern +31 und +32. Hierbei handelt es sich um den Bereich, in dem die Art der Schwellen gewechselt wurde. Im Messbereich sind von der Schwelle -60 bis +31 durchgehend Schwellen vom Typ B 70W verbaut, ab Schwelle +32 sind es Schwellen der Art B 70G. Zusätzlich befindet sich in dem Schwellenfach erneut ein Schienenstoß, dieser ist unzentrisch zwischen den beiden Schwellen und befindet sich etwas näher an Schwelle +31. Der Schienenstoß tritt sowohl an der linken als auch an der rechten Schiene auf.

Die beiden Fehlstellen sind in Abbildung 3.4 zu sehen.

Die Positionen weiterer Fehlstellen am Gleis im relevanten Messabschnitt wurden unter

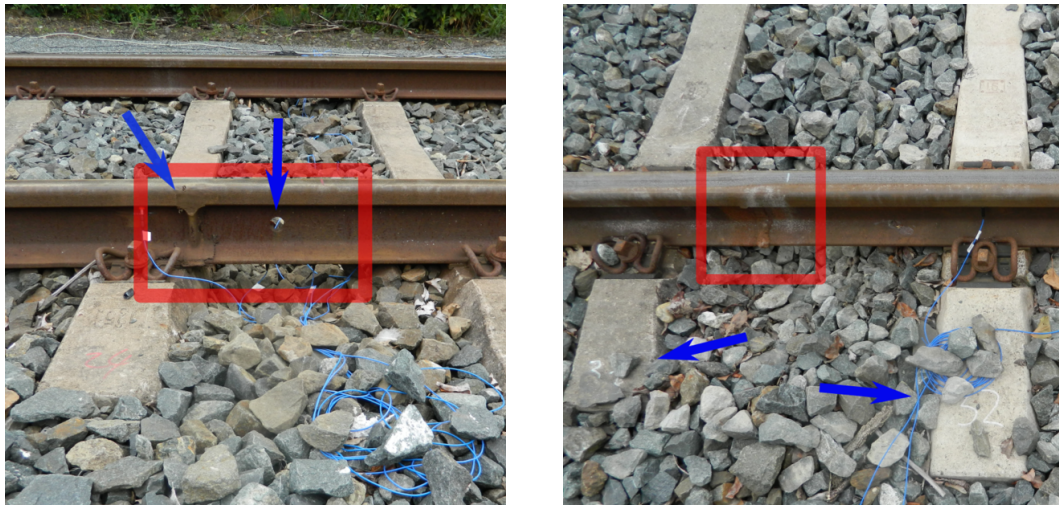


Abbildung 3.4: Fehlstellen am Gleis, links: Loch in der Schiene und Schweißnaht, rechts: Schwellenwechsel und Schweißnaht

Angabe des Schwellenfachs als Bezugsort in positiver oder negativer Richtung dokumentiert. Sie sind in Tabelle 3.4 zu finden.

Linke Schiene	
Schwellenfach	Fehlertyp
–60/–61	Schienenstoß
–51/–52	Schienenstoß
–43/–44	Schienenstoß, 2 Löcher
–30/–31	Schienenstoß
–14/–15	Schienenstoß
–7/–8	Schienenstoß
+7/+8	Schienenstoß
+15/+16	Schienenstoß
+23/+24	Schienenstoß, Loch
+31/+32	Schienenstoß
+51/+52	Schienenstoß

Rechte Schiene	
Schwellenfach	Fehlertyp
–59/–60	Loch
–58/–59	Schienenstoß, Loch
–54/–55	Schienenstoß
–32/–33	Schienenstoß
–25/–26	Schienenstoß, 2 Löcher
–9/–10	Schienenstoß
+13/+14	Schienenstoß
+18/+19	Schienenstoß
+31/+32	Schienenstoß
+51/+52	Schienenstoß

Tabelle 3.4: Fehlstellen am Gleis im relevanten Messbereich

3.4 Fahrzeuge

Bei den für die Vorbeifahrtmessungen verwendeten Fahrzeugen handelte es sich um die Lok 6 des Braunschweiger Hafens (Firma: Maschinenbau Kiel, Gewicht: 40t) und ein Zweiwegefahrzeug (RailDriVe: Mercedes Vario, Gewicht laut Fahrzeugschein: 6,86 t) des DLR. Diese sind in Abbildung 3.5 zu sehen.

Beide Fahrzeuge sind während der Messungen flexibel einsetzbar, können aber nur in Betriebsgeschwindigkeiten kleiner 30 km/h genutzt werden. Der Messabschnitt wurde während der Datenaufzeichnungen sowohl vorwärts als auch rückwärts befahren, da ein Wenden der Fahrzeuge nicht möglich war.

Beide Fahrzeuge haben jeweils zwei Radachsen, also vier Räder. Sie sind für eine Schienen normalspurweite von 1435 mm ausgelegt. Der Antrieb des RailDriVe erfolgt bei Schienenfahrt über die Straßenreifen der hinteren Achse. Diese übertragen Antriebs- und Bremskräfte durch Reibschluss zwischen den Gummireifen und den Reibtrommeln der hinteren Schienenräder.



Abbildung 3.5: Gemessene Fahrzeuge, links: Zweiwegefahrzeug RailDrivE des DLR, rechts: Rangierlok 6 des Braunschweiger Hafens

Eine zusätzliche Bremswirkung wird über Trommelbremsen an der Vorderachse bewirkt. Das RailDrivE ist mit diverser Messequipment ausgestattet, wie z.B. einem GNSS (Global Navigation Satellite System), einem Dopplerradar, einem Achsimpulsgeber (Messung der Raddrehzahl zur Ermittlung von Weglänge und Fahrtrichtung) und einer Inertialmesseinheit IMU.

Zusätzlich messen beide Fahrzeuge die Achslagerbeschleunigungsdaten mittels Sensoren, die vorne rechts und links an auf die Achslager geklebte Metallplatten geschraubt sind. Dies ist exemplarisch für die Lok im Anhang in Abbildung A.1 zu sehen. Das verwendete Messsystem in den Fahrzeugen benutzt zur Erfassung der dynamischen Fahrzeugreaktionen breitbandige (8 Hz–8000 Hz) triaxiale Achslagerbeschleunigungssensoren. Weitere Informationen zum Messsystem des DLR sind zum Beispiel [12] zu entnehmen.

3.5 Messequipment

Das verwendete Messequipment für die schienenseitigen Messungen ist in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Für die Rauheitsmessungen von Schiene und Rad wurden zwei Messgeräte der Firma Müller-BBM GmbH verwendet. Die Geräteeigenschaften sind in Tabelle A.3 im Anhang zusammengestellt.[46]

Name	Hersteller, Typ	Verwendung
Typhoon	SINUS (64 Kanäle)	Überfahrmessungen, Array (hier nicht betrachtet) und Aufnahme der Beschleunigungssignale, der Lichtschrankensignale, der Mikrofone und des UKW-Radiosender
Oros 35	Oros (8 Kanäle), Seriennummer 901654	Anschluss der Beschleunigungsaufnehmer und Impulshammer für TDR und Oberbausteifigkeit
33 Beschleunigungsaufnehmer	24x M353B18 und 5x M353B15, 4x Triaxialaufnehmer 356B2	Geklebt bei Beschleunigungsmessungen, für TDR und Steifigkeitsmessung mit Magnet befestigt; Plättchen waren elektrisch isolierend
Kleiner und großer Impulshammer	Klein: PCB 086C03, Masse: 0,16 kg + 75 g Zusatzmasse mit Aufschlagtip (hart, Edelstahl); groß mit schwarzem Gummiaufsatz	TDR und Steifigkeitsmessungen
3 Lichtschranken	Eigenbau vom Fachgebiet Schienenfahrzeuge der TU Berlin für S49 Profile	Messung der Geschwindigkeit
2 Mikrofone	Typ: PCB 2671 1/2" mit Windschutz	Messung Luftschall
Wetterstation	PCE-FWS20N	Temperatur- und Windmessung
Infrarot-Thermometer	Voltcraft IR500-105	Temperatur von Schiene, Zwischenlager, Luft

Tabelle 3.5: Schienenseitiges Messequipment

3.6 Digitale Signalverarbeitung

In diesem Abschnitt wird auf die digitale Signalverarbeitung der Messdaten eingegangen, die hierfür notwendigen grundlegenden mathematischen Funktionen und Operationen sind [41, S.537 ff.] zu entnehmen.

Um die gemessenen Zeitdaten der Beschleunigungsaufnehmer numerisch in frequenzabhängige mechanische Größen umzurechnen, kann die Methode nach Welch verwendet werden. Das ist eine Methode zur Bestimmung des spektralen Leistungsdichtespektrums und somit der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion (*frequency response function*, FRT) mittels diskreter Fouriertransformation. Die genauen mathematischen Schritte der Methode zur Schätzung von Leistungsdichtespektren mittels einer Fouriertransformation nach Welch können [47] entnommen werden.

Hierbei wird zusätzlich eine Fensterfunktion verwendet. Diese ist notwendig, da eine Fouriertransformation nur auf periodische Signale bezogen werden kann. Um also eine Verzerrung der Messdaten zu vermeiden, wird das Signalspektrum mit dem Spektrum einer Fensterfunktion gefaltet. In [48, S.10] werden unterschiedliche Fensterfunktionen vorgestellt, im Weiteren wird stets ein von-Hann- oder auch Hanning-Fenster verwendet. Dieses besteht aus einer Überlagerung von drei spektral gegeneinander verschobenen *si*-Funktionen.

Mit dieser Methode werden aus den gemessenen Beschleunigungen und Krafteingängen sowohl die Autoleistungsspektren $G_{aa}(f)$ und $G_{ff}(f)$ als auch das Kreuzleistungsspektrum $G_{fa}(f)$ bestimmt. Für die Messdaten gilt die der Annahme, dass das Eingangssignal (Hammerimpuls) weitestgehend rauschfrei ist, während das Ausgangssignal am Beschleunigungsaufnehmer von Störsignalen beeinträchtigt sein kann, lässt sich nun die Übertragungsfunktion durch Bildung des Quotienten von Ausgangs- und Eingangssignal unter Ausnutzung der Störgeräuschbefreiung durch Korrelation bestimmen. Für den Schätzer des Frequenzgangs \underline{H} gilt dann: [48, S.14-20]

$$\underline{H}(f) = \frac{G_{fa}(f)}{G_{ff}(f)} \quad (3.1)$$

Diese Größe entspricht wiederum der bereits in Gleichung 2.11 vorgestellten Akzeleranz. Hieraus können also die mechanischen Eigenschaften der gemessenen Struktur abgeleitet werden.

Im Weiteren werden die Messergebnisse zumeist nach der zuvor beschriebenen Methode nach [47] als spektrale Leistungsdichten dargestellt. Insbesondere zur Quantifizierung der gemessenen Schallabstrahlung im Luftschall empfiehlt sich die Darstellung mittels eines spektralen Leistungsdichtespektrums (PSD) [47].

4 Synchronisierung

Um die Messdaten aus den unabhängigen Messsystemen zur Achslagerbeschleunigungsmessung an einem fahrenden Zug und gleisseitigen Messungen mit Beschleunigungsaufnehmern sowie der Messung von Luftschall zu vergleichen, musste eine Möglichkeit der Synchronisierung gefunden werden. Diese Synchronisierung ist notwendig, um die Messdaten anhand einer gemeinsamen Zeitachse vergleichen zu können.

Es gibt zahlreiche mögliche messtechnische Umsetzungen zur Messrechnersynchronisierung wie die zeitliche Synchronisierung mit Hilfe einer *DCF77 Radio Clock* [49] oder mittels GPS-Daten, z. B. mit dem *GPS165* [50], einem Satellitenempfänger mit integriertem Zeitcodegenerator. Erstere Optionen ist für die durchzuführenden Messungen ungeeignet, da sie je nach Gerät nur eine Genauigkeit von 5 – 200 ms liefert. Die GPS-Variante wiederum hat eine sehr genaue Auflösung (100 ns nach 20 minütigem Betrieb, 3 μ s während der ersten 20 Minuten). Die Lösung mit GPS ist genauer, aber kostenaufwendiger. Außerdem ist der Aufbau von Antennen, wie er für den geforderten GPS-Empfang notwendig wäre, zeitlich und logistisch aufwendiger. Es bietet sich daher eine weitere Variante an, und zwar die kostengünstige Synchronisierung der Messrechner mittels UKW-Empfängern durch das synchrone Aufnehmen eines identischen Senders auf einem zusätzlichen Kanal an allen unabhängigen Messsystemen. Diese Variante wurde für die Messungen im Juni gewählt.

4.1 Synchronisierung mittels UKW-Empfängern

Bei der Synchronisierung der Messdaten mittels UKW-Empfängern wird synchron über einen zusätzlichen Kanal in beiden Systemen das UKW-Signal eines identischen Senders aufgezeichnet. Mit dessen Hilfe erfolgt eine Synchronisierung in der Datenverarbeitung.

Ultrakurzwellen, kurz UKW, sind Radiowellen im Bereich von 30 – 300 MHz, entsprechend Wellenlängen von 1 – 10 Metern. Die Reichweite von UKW-Sendern beträgt zwischen 10 und 200 Kilometern. [51] Somit sind die im Messaufbau zu berücksichtigenden örtlichen Abstände von höchstens wenigen Metern nicht problematisch und verursachen keine relevante Verzögerung der Empfangssignale zueinander.

Die Anforderungen an die verwendeten UKW-Empfänger sind nicht besonders groß. Die Empfänger brauchen eine eigene Energieversorgung, zum Beispiel mittels Batterie, und sollen eine akkurate Einstellungsmöglichkeit des gewählten gemeinsamen Senders ermöglichen. Außerdem sollen sie über analogen Radioempfang verfügen. Wichtig war hierbei insbesondere, dass die gewählten UKW-Empfänger baugleich sind, um interne baubedingte Streuungen gering zu halten.

Kleine Taschenradios gibt es bereits sehr günstig zu kaufen. Diese Geräte verfügen meist über einen Kopfhörerausgang, sind akku-/batteriebetrieben und sehr handlich gebaut. Leider

lassen sich die Sender zumeist nur über ein Drehrädchen bzw. die automatische Sendersuche einstellen, sodass dies teilweise ungenau ausfallen kann. Es empfiehlt sich deshalb die Wahl eines starken Senders. Die zusätzliche Fixierung eines eingestellten Empfangssenders mittels z. B. Klebeband am Gerät ist möglich.

Für den Versuchsaufbau wurde sich für das kostengünstige Analogradio *City 31 PR 3201* der Firma GRUNDIG entschieden [52]. Es wurde nur ein Monosignal des UKW-Empfängers aufgezeichnet. Das Radio verfügte über eine automatische UKW-Scharfabstimmung (AFC), die das rauschfreie Einstellen eines Senders vereinfacht.

4.2 Überprüfung des Systems

Es sind Testmessungen an beiden Systemen von Vorteil, um den Anschluss der neuen Messkomponente sowie das sichere Übertragen der UKW-Messdaten zu überprüfen. Denn selbst baugleiche Radios können aufgrund von Exemplarstreuungen der Bauteile, vor allem der analogen Komponenten, leichte Phasenunterschiede im Ausgang aufweisen. Außerdem kann so die Genauigkeit der Synchronisierung der Messungen über das UKW-Signal überprüft werden.

Der zum Vergleich verwendete Messaufbau bestand aus einem Mehrkanalmesssystem (Typhoon von Sinus) und vier Radios. Es wurden jeweils zwei Radios parallel an den Messrechner angeschlossen. Das empfangene Radiosignal eines vorher eingestellten Senders wurde parallel aufgezeichnet.

Es wurden die Radios 2, 3 und 4 jeweils mit dem Referenzradio 1 verglichen. Die Ergebnisse zeigten eine perfekte Korrelation der Radios 1 bis 4 untereinander. Durch die in den gewählten Radios integrierte automatische UKW-Scharfabstimmung waren Testmessungen bei unscharfem Senderempfang nicht möglich, da der Sender auch bei leichter Verstellung des Einstellungsradchens scharf empfangen wurde.

Zum Abschluss wurde die Synchronisierung von unabhängigen Messrechnern über das UKW-Signal getestet. Hierzu wurde neben dem Mehrkanalmesssystem Typhoon auch ein zweites Mehrkanalmesssystem (Torndio von Sinus) verwendet. An beide Messrechner wurde jeweils ein Radio angeschlossen und auf den gleichen Empfangssender eingestellt. Auf einem weiteren Kanal wurde an beiden Systemen jeweils über ein Mikrofon ein Audiosignal aufgezeichnet, welches als weitestgehend identisch angenommen wurde, da die Empfangsmikrofone direkt nebeneinander im gleichen Abstand und sehr nah zur Quelle positioniert wurden. Es wurden die Audio- und die Radiosignale aufgezeichnet. Durch die numerische Korrelation der Radiosignale miteinander konnte nun bestimmt werden, um wie viele Samples die beiden Messungen zueinander verschoben waren (siehe Abschnitt 4.3).

Die beiden Mikrofonsignale konnten mit Hilfe der Radioaufzeichnungen aneinander angepasst werden. Sie stimmten mit einer Genauigkeit von einem Sample miteinander überein. Die Methode ist also gut zur Synchronisierung der Messungen geeignet.

Während der Messungen mit Fahrzeugvorbeifahrten wurde dann jeweils ein Radio an die drei unabhängigen Messsysteme (Lok, RailDrivE und Messrechner Typhoon) angeschlossen. Bereits während der Messungen ist aufgefallen, wie stark die Radios durch die anderen Messkomponenten beeinflusst wurden. So konnte bei den gleiseitigen Messungen erst eine

gute Aufzeichnung des Radiosenders bei Positionierung des Radios weit abseits des restlichen Messaufbaus realisiert werden. Da ein vorheriger Einblick in die Radioaufzeichnungen weder am RailDriVe noch an der Lok möglich war, konnten dort entsprechende Korrekturen nicht durchgeführt werden. Hier wurden die Radios teilweise in der Hand gehalten, um einen Abstand zu den anderen Messsystemen zu gewährleisten und die gegenseitige Beeinflussung zu reduzieren.

4.3 Datenverarbeitung

Die verwendeten Messsysteme zeichnen die Daten mit unterschiedlichen Abtastraten auf. Um die Messdaten zu synchronisieren, mussten zunächst alle Daten auf eine gemeinsame Abtastfrequenz umgerechnet werden. Für diese Abtastratenumsetzung wurde eine bandlimitierte *si*-Interpolation verwendet. Die genaue Methode sowie unterschiedliche Fehleranalysen dieser Abtastratenumsetzung sind in [53] zu finden.

Nun konnten die beiden zu synchronisierenden Signale auf eine gleiche Länge zugeschnitten werden. Anschließend konnte eine Kreuzkorrelation der Signale durchgeführt werden (siehe [48]). Das Maximum der Korrelationsfunktion entspricht dem Versatz in Samples der beiden Signale zueinander. Somit konnten die beiden Signale nun anhand einer gemeinsamen Zeitachse synchronisiert werden. Dieser Versatz gilt nicht nur für die Radiosignale, sondern wird auch auf die Beschleunigungsdaten übertragen. Auch diese konnten somit synchronisiert werden.

5 Aufbau und Durchführung der Messungen

Es folgt eine Übersicht über die durchgeführten Messungen. Die schienenseitigen Messungen sind tabellarisch im Anhang A.1 zur Übersicht aufgelistet.

5.1 Voruntersuchung und Auswahl des Messbereichs

Die Vormessung diente zur Einschätzung, ob das ausgewählte Schwellenfach repräsentativ sei. Zur Auswahl des Messabschnitts am Gleis wurden die Kriterien zur Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschemessungen der DIN EN 15461:2011 [26] berücksichtigt.

Der Messaufbau bestand aus dem kleinen Messrechner Oros 35, einem Beschleunigungsaufnehmer PCB M353B18 und dem kleinen Impulshammer PCB 086B03 (siehe Tabelle 3.5).

Zur Messung wurde der Aufnehmer mit einem Magneten unter und auf der Schiene in Schwellenfachmitte befestigt, die Schiene wurde dann mit dem Impulshammer sechsmal direkt neben der Aufnehmerposition angeschlagen. Das Prozedere wurde in den beiden Schwellenfächern daneben wiederholt (einmal rechts, einmal links vom Schwellenfach 0). Das Anschlagen der Schiene ist beispielhaft in Abbildung 5.1 zu sehen.

Für die Vergleichbarkeit der Messdaten sollte sich der Messbereich nicht in der Nähe von Auffälligkeiten am Gleis befinden, nach DIN CEN/TR 16891:2017 [25] wird empfohlen, dass innerhalb von weniger als 3 m zum Beschleunigungsaufnehmer keine hohlliegende Schwelle vorhanden sein sollte sowie keine fehlende oder beschädigte Schienenspannklemme. Außerdem darf der Beschleunigungsaufnehmer nicht in einem Abstand von weniger als 5 m zu einer Schweißnaht und 40 m zu einer Dehnungsfuge befestigt werden.

Nach DIN EN 15461:2011 [26] müssen drei direkte FRF (*frequency-response functions*, kurz: FRF) an mindestens drei potentiellen Positionen des Beschleunigungsaufnehmers gemessen werden. Sind mindestens zwei der FRF vergleichbar, kann davon ausgegangen werden, dass die jeweilige Position des Beschleunigungsaufnehmers repräsentativ für die Gesamtheit des Prüfabschnitts ist. In diesem Fall wird das Schwellenfach als geeignet eingestuft. Wird in der ersten Reihe potentieller Positionen keine geeignete Position des Beschleunigungsaufnehmers festgestellt, müssen weitere Reihen und dort gemessene direkte FRF untersucht werden, bis eine passende Reihe gefunden wird.

Hier wurde ein Schwellenfach möglichst fernab von Fehlstellen am Gleis gewählt und als vorläufiges Schwellenfach 0 gekennzeichnet. Zur Bewertung des Schwellenfachs wurden die Übertragungsfunktionen über die Akzeleranzen im jeweiligen Messpunkt berechnet.

Es mussten mehrere Schwellenfächer untersucht werden, bis ein akzeptables Fach gefunden wurde.

Das in Abbildung 3.1 als Nullpunkt TDR gekennzeichnete Schwellenfach wurde in den Vor-



Abbildung 5.1: Voruntersuchung der Schiene: Anschlagen der Schiene mit dem kleinen Impulshammer direkt neben einem Empfangsaufnehmer

messungen als geeignet eingestuft und für die weiteren Messungen als Schwelle 0 (siehe Nummerierung, Abbildung A.2) betrachtet. Das Schwellenfach zwischen Schwelle 0 und +1 wird im Weiteren als Referenzschwellenfach in Abgrenzung zu den beiden untersuchten Fehlstellen bezeichnet. Es folgt die Nummerierung der angrenzenden Schwellen von +1 bis +68 in positiver Fahrtrichtung und von –1 bis –68 in negativer Fahrtrichtung jeweils auf der linken und rechten Schiene.

Die zahlreichen Fehlstellen am Gleis schränkten die Auswahl bedeutend ein. Auch wenn die gewählte Schwelle 0 nicht ideal ist, wird sie als repräsentativ und im Vergleich mit anderen Gleisabschnitten als weitestgehend frei von Fehlstellen bewertet. Außerdem musste auf die örtlichen Begebenheiten und im Speziellen den einfachen Zugang zum Messbereich Rücksicht genommen werden. Hierbei wurde die Auswahl zusätzlich durch den teilweisen Pflanzenbewuchs am Schienenrand eingeschränkt.

5.2 Messung der Radrauheit

Da die verwendete Rangierlok mit einer Masse von 40 t nicht ohne Weiteres aufgebockt werden konnte, erfolgte die Radrauheitsmessung ausschließlich an den Rädern des RailDrive. Gemessen wurde hier mit dem m|wheel Messgerät von Müller BBM, welches an einen Messlaptop angeschlossen wurde (siehe Tabelle A.3). Der Messaufbau ist in Abbildung 5.2 zu sehen.



Abbildung 5.2: Messaufbau der Rauheitsmessung mit dem m|wheel Messgerät am RailDrive

Die Messung erfolgte nacheinander an allen vier Rädern, hierzu wurde zunächst der Radsatz hydraulisch starr auf einen Abstand von wenigen Zentimetern über der Schiene (maximal 10 cm) angehoben, sodass die Räder frei beweglich waren. Anschließend mussten die Laufflächen der Räder gereinigt werden. Die Messung erfolgte pro Rad auf mindestens drei Spuren, diese müssen nach DIN EN 15610:2017 [54] einen Abstand von 10 mm zueinander haben, wobei die mittlere Messspur sich in der Mitte der Referenzfläche befinden sollte. Die Auswahl der Referenzfläche erfolgte anhand der deutlich erkennbaren Fahrfläche, in deren Mitte der Taster positioniert wurde. Sollte diese nicht optisch erkennbar sein, wäre auch die Stelle mit dem häufigsten Rad-Schiene-Kontakt (Simulationsrechnung aus der Geometrie des Schienen- und des Radprofils) bzw. die nominale Fahrfläche des Rads als Mittelspur wählbar gewesen. [54] Die hier jeweils verwendeten Messspuren waren gut sichtbar und sind im Anhang in Tabelle A.6 aufgeführt.

Das m|wheel-Messgerät wurde am Gleis aufgestellt und der mechanische Taster mit dem Rad in Kontakt gebracht. Ein Magnet wurde am Rad befestigt, welcher über einen Sensor die Messung bei Überschreitung startete. Die Messung endete automatisch nach einer Radumdrehung, wenn der Magnet erneut detektiert wurde.

Während der Messung wurde das Rad manuell gedreht. Um die Qualität der Messungen bewerten zu können, wurde nach dem Aufbau des Messsystems ein Reproduzierbarkeitstest der Messergebnisse durchgeführt. Dieser beinhaltete das dreimalige Messen einer identischen Spur eines Rades. Der Test gilt als bestanden, wenn sowohl im Messsignal selbst wie auch im Terzspektrum keine Abweichungen von mehr als 3 dB auftreten. Dies bedeutet unter anderem es dürfen keine Anteile enthalten sein, die aus dem Drehen der Räder per Hand resultieren und das Messsignal muss geschlossen sein. Der Unterschied des ersten und letzten Messwerts muss also weniger als 25 μm betragen.

Die Messdaten des Reproduzierbarkeitstests sind im Anhang A.4 zu finden. Da der Test erfolgreich war, erfolgten anschließend die Messungen der jeweils drei Spuren pro Rad.

Die Berechnung der Rauheitspegel aus den Messdaten erfolgte nach DIN EN 15610:2009 [21] mittels der Auswertungssoftware *m|wheel analyse* (Version 1.1) von Müller-BBM GmbH.

Die Datennachbearbeitung beinhaltet die Entfernung von schmalen herausstehenden Spitzen, da diese kleiner sind als die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene und somit von dieser übersehen werden (siehe Abschnitt 2.1). Außerdem wird eine Korrektur der Auswirkung des kleinen Radius der Tastspitze im Verhältnis zum Krümmungsradius eines Rades durchgeführt [21, S.9 ff.]. Anschließend erfolgt die Berechnung der Terzspektren der Rauheit. Die hierfür notwendigen Berechnungsschritte sind zunächst eine diskrete Fourier Transformation (DFT) des Signals in den Wellenlängenbereich, anschließend die Berechnung des Rauheitspegels L_r nach Gleichung 2.4. Zuletzt erfolgt die Summenbildung des Schmalbandspektrums sowie die quadratische Mittelung der Terzspektren aus den mehrfach wiederholten Messungen.

Für jede Messspur wurde die Messung mindestens dreimal wiederholt, wegen Messungenauigkeiten mussten sie aber teilweise auch häufiger wiederholt werden. Die Räder wurden hierbei entsprechend der Skizze in Abbildung 5.3 benannt.

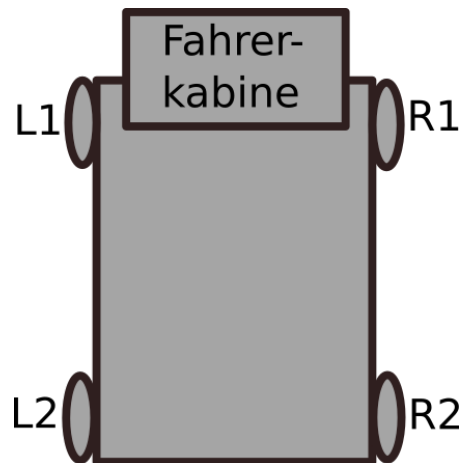


Abbildung 5.3: Nummerierung der Räder für die Messung der Radrauheit am RailDriVe mit dem m|wheel in der Draufsicht

5.3 Messung der Schienenrauheit

Die Messung der Schienenrauheit erfolgte mit einem Gerät vom Typ m|rail Trolley der Firma Müller-BBM GmbH. Die Messung erfolgte auf der linken und rechten Schiene jeweils auf einem Messabschnitt von 86 m. Hierbei wurde nach DIN 15610:2017 [54] die Rauheit auf beiden Schienen auf jeweils drei Messspuren bestimmt. Die Rauheit des linken Gleises wurde in negative Fahrtrichtung mit dem Messgerät vermessen, die des rechten Gleises in positive Richtung.

Der Messtrolley m|rail ist in Abbildung 5.4 zu sehen, er verfügt über eine Halterung für den



Abbildung 5.4: Messung der Schienenrauheit mit dem m|rail

Messlaptop.

Für die Messung wird zunächst die Schienenlauf­fläche gereinigt und mit einem Kontaktspray geschmiert. Der Trolley wird auf die Schiene gesetzt und der Ausleger so eingestellt, dass das Stützrad in der Mitte der Nachbarschiene positioniert ist. Anschließend wird die Messspur in Abhängigkeit der Schienenkante eingestellt und die Messung am Messlaptop initialisiert.

Während der Messungen wurde der Trolley in langsamer Schrittgeschwindigkeit über das Gleis geführt. Mittels eines mechanischen Tasters konnte so die Schienenrauheit auf der zuvor eingestellten Spur erfasst werden. Die Datenaufzeichnung endete automatisch, wenn die eingegebene Messlänge erreicht war oder die Messung manuell beendet wurde.

Die Bearbeitung der Rohdaten erfolgte auch hier nach DIN EN 15610:2009 [21] mittels der Software *m|rail analyse* (Version 1.1) von Müller-BBM GmbH. Zunächst wurde erneut eine Spitzenentfernung sowie eine Krümmungskorrektur durchgeführt, da davon ausgegangen werden kann, dass die Spitzen von winzigen Verunreinigungen auf der Schienenfahrfläche herrühren und keinen Einfluss auf die akustische Rauheit haben. Anschließend wurden die Messdaten in überlappende Segmente mit einer Länge von mindetsens 1 m geteilt, es wurde eine Von-Hann-Fensterfunktion auf die Messdaten angewendet und eine DFT durchgeführt. Aus den Daten wurde dann der Pegel gemäß Gleichung 2.6 berechnet und der Terzband-Pegel aus dem Schmalbandspektrum berechnet. Die Mittelwertbildung der Terzspektren erfolgte in der verwendeten Software, es wurden alle Terzspektren energetisch gemittelt. Um die Streuung der Messdaten zu zeigen, wurde zusätzlich die obere und untere Einhüllende aller gemittelten Terzspektren ausgegeben.



Abbildung 5.5: Einstellen des Tasters des m|rail mit Bezug auf die Fahrspur

5.4 Messung der Schwellenabstände

Um Abweichungen zwischen den Schwellenabständen zu dokumentieren, wurden von der Schwelle 0 ausgehend die Abstände gemessen. Dies erfolgte an beiden Schienen jeweils in positive und negative Richtung unter Verwendung eines Laserentfernungsmessgerätes. Es wurde jeweils von der Außenkante der Schwelle 0 aus der Abstand bis zur nächsten Kante gemessen (siehe Bild 5.6). Die Messungen in negative und positive Fahrtrichtung haben daher einen unterschiedlichen Startpunkt. Die Messung erfolgte in beide Richtungen über den gesamten Messbereich.

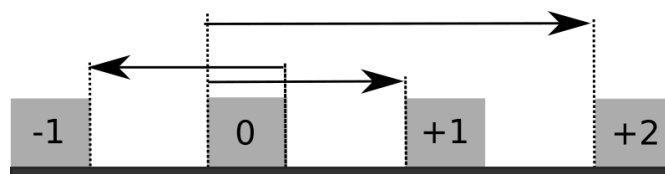


Abbildung 5.6: Vorgehen bei der Messung der Schwellenabstände ausgehend von der Schwelle mit der Nummer 0

5.5 Messung der Steifigkeit

Um die Federeigenschaften des Oberbaus abbilden zu können (siehe Abschnitt 2.1.3), wurden Steifigkeitsmessungen durchgeführt. Der Messaufbau bestand aus einem Mehrkanalsystem (zunächst Oros 35, anschließend auch Typhoon), einem Beschleunigungsaufnehmer mit

Magnetem und dem großen und kleinen Impulshammer (siehe Tabelle 3.5). Der Aufnehmer wurde am Messpunkt mit einem Magneten an der Schiene angebracht. Unmittelbar neben dem Aufnehmer wurde mit dem Impulshammer sechsmal angeschlagen. Die Messung wurde für die Schwellen im Bereich der Fehlstelle 1 in den Schwellenfachmitten und im Bereich der Fehlstelle 2 über den Schwellen durchgeführt (siehe Abbildung 5.7 für die verwendeten Messpunkte). Außerdem wurde am Referenzschwellenfach sowohl an der linken als auch an der rechten Schiene jeweils für die Schwellen im Bereich von -8 bis 8 gemessen.

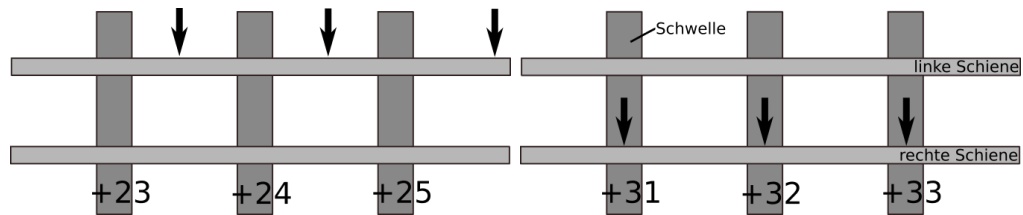


Abbildung 5.7: Anschlagspositionen für die Steifigkeitsmessungen an den beiden Fehlstellen, links: Fehlstelle 1, rechts: Fehlstelle 2

5.6 Messung des Abklingverhaltens der Schiene

Bei der Messung des Abklingverhaltens der Schiene wurden drei TDRs parallel erfasst. Der verwendete Messaufbau ist im Anhang in Abbildungen A.3 dokumentiert. Vor dem Messbeginn wurden die notwendigen Anschlagspositionen auf der Schiene angezeichnet und nummeriert (siehe Abbildung A.2).

Es wurden pro Gleis drei Aufnehmer verwendet. Für die vertikale Messung wurden die Aufnehmer in der Längsachse der Schiene auf dem Schienenkopf positioniert. Es wurden auch laterale TDRs gemessen, da diese aber nicht weiter Bestand der folgenden Auswertungen sind, wird auf diese nicht im Detail eingegangen.

Zusätzlich wurde ein Aufnehmer unter der Schiene in Schwellenfachmitte befestigt. Die Beschleunigungsaufnehmerpositionen sind in der Abbildung 5.8 skizziert, die Aufnehmer befanden sich jeweils in der Schwellenmitte zwischen den Schwellen -1 und 0 , 0 und 1 sowie 1 und 2 . Zur Übersicht sind die Positionen noch in Tabelle 5.1 vermerkt und in Abbildung A.3 zu sehen. Dort ist auch die jeweilige Messrichtung der Aufnehmer angegeben. Für das

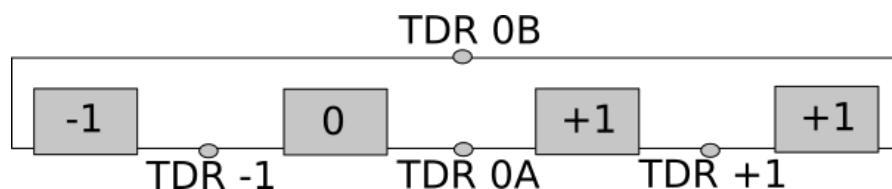


Abbildung 5.8: Skizze der horizontalen Schienenansicht mit gekennzeichneten Beschleunigungsaufnehmerpositionen bei der TDR-Messung

linke Gleis erfolgte die Positionierung der Aufnehmer analog.

In Abbildung 5.8 sind die jeweiligen Beschleunigungsaufnehmerpositionen bei der TDR-Messung skizziert. Diese entsprechen den Nullpunkten der drei gemessenen TDRs. An dem Aufnehmer an der Position TDR-1 wurde die folgend als TDR A bezeichnete Abklingrate gemessen. An dem Aufnehmer an der Schwellenfachmitte TDR0A wurde die TDR B gemessen. Rechts davon wiederum war das Schwellenfach mit der Mitte TDR+1, wo die TDR C gemessen wurde.

Der fünfte Aufnehmer wurde während der gesamten Messung stets zu den Anschlagpositionen mitgeführt. Mit diesem wurde somit parallel zu den TDR-Messungen auch die jeweilige Punkteingangsimpedanz erfasst.

Da die Abklingraten von den Materialeigenschaften der Schienenzwischenlage abhängen, wurde ergänzend die Schienentemperatur während der Messungen erfasst.

Im Anhang, in Abbildung A.2, ist eine Erläuterung zu den Anschlagpositionen für die drei TDRs (A, B und C) nach DIN EN 15461:2011 [26] zu sehen. Dort sind die verwendeten Hammerschlagimpulspositionen mit Bezug auf das jeweilige Bezugsschwellenfach gekennzeichnet. Im Nahfeld des jeweiligen Nullpunktes der TDR bis zum Ende des Schwellenfachs erfolgten die Impulse in Schritten der Länge von einem Viertel der Schwellenfachlänge. Bis zur Mitte des vierten Schwellenfachs ausgehend vom Bezugsschwellenfach wurde die Schiene in Abständen von einer halben Schwellenfachlänge angeschlagen. Die Impulse erfolgten bis zum achten Schwellenfach jeweils in der Schwellenfachmitte. Anschließend erfolgten die Impulse im Schwellenfach 10, 12, 16, 20, 24, 30, 36, 42, 48, 54 und 66 relativ zum Bezugsschwellenfach gesehen. Dies gilt für die positive und negative Messrichtung. Für die drei gemessenen TDRs ergibt sich pro Schiene eine Gesamtanzahl von 87 Hammeranschlagpositionen (29 pro Ausgangsschwellenfach) pro Messrichtung.

Zunächst erfolgte die Messung am rechten Gleis. Dazu wurde mit dem kleinen Hammer auf den markierten Positionen vertikal angeschlagen. Anschließend folgte die Messung in negative Richtung.

Prinzipiell wurden jeweils immer sechs Schläge ausgeführt und die Kohärenz sowie die Zeitfunktion von den Beschleunigungsaufnehmern und dem jeweiligen Hammerschlag am Mehrkanalsystem überwacht. Gespeichert wurde der jeweilige zeitliche Signalverlauf für eine Messdauer von 1,5 s. Der Dynamikbereich des Oros 35 wurde wenn notwendig angepasst für die weiter von der Schwelle 0 entfernten Anschlagpositionen.

Die TDR-Messungen wurden analog für das linke Gleis durchgeführt. Außerdem wurden die Messungen mit dem großen Hammer für beide Gleise wiederholt, hierbei wurden jedoch nur

Aufnehmer	Richtung	Position
TDR-1	v	unter Schienenfuß, Mitte der Schwelle zwischen -1 und 0
TDR 0A	v	unter Schienenfuß, Mitte der Schwelle zwischen 0 und 1
TDR 0B	v	Schienenkopf, Mitte der Schwelle zwischen 0 und 1
TDR+1	v	unter Schienenfuß, Mitte der Schwelle zwischen 1 und 2
TDR H	v	Schienenkopf, wird beim Anschlagen mitgeführt

Tabelle 5.1: Positionen der Beschleunigungsaufnehmer bei der TDR-Messung

die Hammeranschlagspositionen für die TDR B und nicht die der angrenzenden Schwellen berücksichtigt.

5.7 Geschwindigkeitsmessung

Da die von den Messsystemen in der Lok und dem RailDriVe gelieferten Geschwindigkeitsdaten überprüft werden sollten, wurde die Geschwindigkeit zusätzlich mit Lichtschranken gemessen. Diese Daten sind für die Datenauswertung der schienenseitigen Messungen notwendig, da so die genauen Überfahrtsgeschwindigkeiten im Messbereich bestimmt werden konnten.

Zur Datenaufzeichnung wurde wieder das Mehrkanalmesssystem Typhoon verwendet. Es wurden drei Lichtschranken genutzt, die speziell für das vorhandene Schienenprofil angefertigt wurden (siehe Tabelle 3.5). Diese wurden an der rechten Schiene befestigt. Zwei Lichtschranken waren symmetrisch um die Schwelle 0, jeweils in der Schwellenmitte zwischen Schwelle $-6/-7$ bzw. $+6/+7$, angebracht. Der gemessene Abstand zwischen den Lichtschranken betrug 8,41 m.

Eine weitere Lichtschranke wurde im Abstand von 18,51 m zur Schwellenfachmitte des Referenzschwellenfachs zwischen Schwelle 0 und 1 aufgebaut.

Die Lichtschranken verfügten über Laser. Bei einer Überfahrt wurde der Laser durch das Fahrzeuggrad unterbrochen und die Lichtschranken gaben ein elektrisches Signal (hier eine 1) aus. Da die physischen Abstände zwischen den Lichtschranken bekannt sind, kann so aus den getriggerten Signalen die jeweilige Überfahrtsgeschwindigkeit mit einer sehr guten Genauigkeit berechnet werden. Exemplarisch ist eine der verwendeten Lichtschranken im Anhang in Abbildung A.8 zu sehen.

5.8 Schwingverhalten der Schiene bei Zugvorbeifahrten

Während der Schienenbeschleunigungsmessungen bei Zugvorbeifahrten erfolgte eine parallele Erfassung der Beschleunigung der Radachsen an Lok und RailDriVe. Die Messdaten der Lok und des RailDriVe wurden kontinuierlich erfasst. Die schienenseitige Datenerfassung wurde jeweils bei der Anfahrt eines Fahrzeugs manuell am Mehrkanalsystem Typhoon ausgelöst.

Es wurde mit der Lok bei je sechs Vorbeifahrten in Maximalgeschwindigkeit (ca. 24 km/h) und sechs Vorbeifahrten bei circa 18 km/h sowie sechs Vorbeifahrten bei circa 12 km/h gemessen. Mit dem RailDriVe wurde bei sieben Vorbeifahrten mit circa 30 km/h und anschließend weiteren Vorbeifahrten in 5 km/h-Schritten nach unten bis zu einer Geschwindigkeit von circa 14 km/h gemessen. Die genauen Überfahrtsgeschwindigkeiten sind Tabelle A.2 zu entnehmen. Sie wurden aus den um das Referenzschwellenfach positionierten Lichtschranken ermittelt (siehe 5.7).

Um das Schwingverhalten der Schiene bei einer Zugvorbeifahrt in vertikaler und in lateraler Richtung zu bestimmen, wurden insgesamt 27 Beschleunigungsaufnehmer sowohl auf der linken als auch rechten Schiene verwendet. Vor dem Anbringen der Aufnehmer wurde die Schiene mit einem an einem Akku-Bohrer befestigten Zylinderschleifaufsatz vom Rost befreit

und danach mit Bremsenreiniger gereinigt, damit die Aufnehmer besser kleben. Alle Aufnehmer wurden mit Sekundenkleber an der Schiene befestigt. Zwischen der Schwelle 0 und der Schwelle +1 wurden sowohl auf der linken wie auch der rechten Schiene jeweils mehrere Aufnehmer geklebt, davon haben je drei die laterale Beschleunigung und die restlichen die vertikale Beschleunigung gemessen. Die Positionen und auch die exakten Abstände zur Schwellenmitte zwischen Schwelle 0 und 1 sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen. In Abbildung 5.9 sind die Positionen der Aufnehmer festgehalten. Außerdem sind Fotos der geklebten

Aufnehmer	Richtung	Abstand zur Mitte des Referenzschwellenfachs	Position
R1	v	−32,25 cm	Triax, Steg
R2	h	−32,25 cm	Triax, Steg
R3	v	−22,30 cm	Fuß
R4	v	−17,50 cm	Fuß
R5	v	−12,20 cm	Fuß
R6	v	−6,00 cm	Fuß
R7	v	+0,50 cm	Fuß
R8	h	0,00 cm	Kopf
R9	v	+13,50 cm	Fuß
R10	v	+32,25 cm	Triax, Steg
R11	h	+32,25 cm	Triax, Steg
L12	v	−32,50 cm	Triax, Steg
L13	h	−32,50 cm	Triax, Steg
L14	v	0,00 cm	Fuß
L15	h	0,00 cm	Kopf
L16	v	+6,20 cm	Fuß
L17	v	+11,90 cm	Fuß
L18	v	+17,60 cm	Fuß
L19	v	+22,20 cm	Fuß
L20	v	+31,60 cm	Triax, Steg
L21	h	+31,60 cm	Triax, Steg

Tabelle 5.2: Positionen der geklebten Beschleunigungsaufnehmer um die Referenzschwelle für die Messung des Schienenschwingverhaltens bei Zugvorbeifahrten (v: vertikal, h: horizontal)

Aufnehmer im Anhang in Abbildung A.6 zu sehen.

Bei den Aufnehmern an den Fehlstellen handelt sich dabei um drei Aufnehmer pro Fehlstelle. Von denen wurde jeweils einer auf die Schwelle unter den Schienenkopf geklebt, einer befand sich unterhalb des Schienenfußes in der Schwellenmitte und der dritte wurde auf halbem Weg zur Schwellenmitte positioniert. Die Aufnehmer waren hier jeweils nur auf einer Gleisseite angebracht. Es wurden jeweils nur Aufnehmer zum Messen der vertikalen Beschleunigung verwendet. Die Positionen der Beschleunigungsaufnehmer an den Fehlstellen sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. In Abbildung 5.10 sind die Aufnehmerpositionen schematisch dargestellt.

Es wurden zunächst Vorbeifahrten mit der Lok gemessen und dann im Anschluss die

Aufnehmer	Richtung	Abstand zur Mitte der Schwelle 24	Position
F1	vertikal	−24,00 cm	Fuß
F2	vertikal	−33,00 cm	Fuß
F3	vertikal	0,00 cm	Kopf
Aufnehmer	Richtung	Abstand zur Mitte der Schwelle 52	Position
F4	vertikal	+32,20 cm	Fuß
F5	vertikal	−0,40 cm	Kopf
F6	vertikal	+20,40 cm	Fuß

Tabelle 5.3: Positionen der Beschleunigungsaufnehmer an den untersuchten Fehlstellen

Vorbeifahrten mit dem RailDrive. Bei den Vorbeifahrten wurden die Fahrzeuge auf die gewünschte Überfahrtgeschwindigkeit beschleunigt, passierten dann den Messabschnitt mit den Beschleunigungsaufnehmern bei möglichst konstanter Geschwindigkeit und bremsten anschließend ab. Die folgende Überfahrt erfolgte dann in entgegengesetzter Fahrtrichtung. Die Messung am Mehrkanalsystem wurde jeweils mit dem Anfahren des Fahrzeugs gestartet. Das Fahrzeug hatte zu diesem Zeitpunkt jeweils einen Abstand von circa 80 m zu dem Messabschnitt mit den Beschleunigungsaufnehmern.

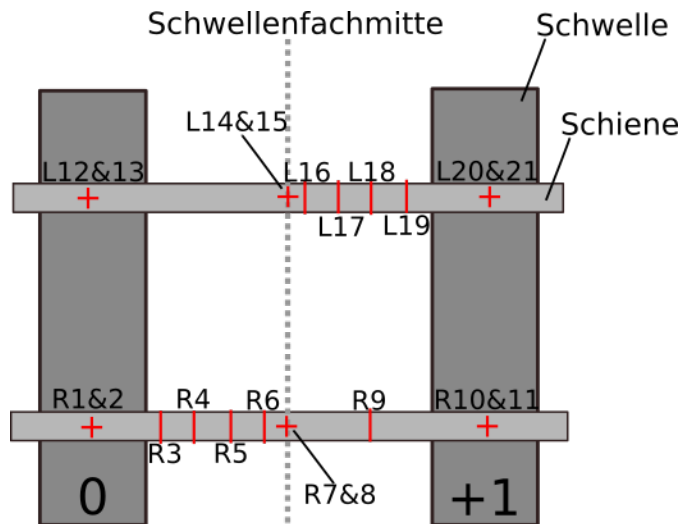


Abbildung 5.9: Positionen der Beschleunigungsaufnehmer am guten Schwellenfach (|: vertikal, +: vertikal und lateral)

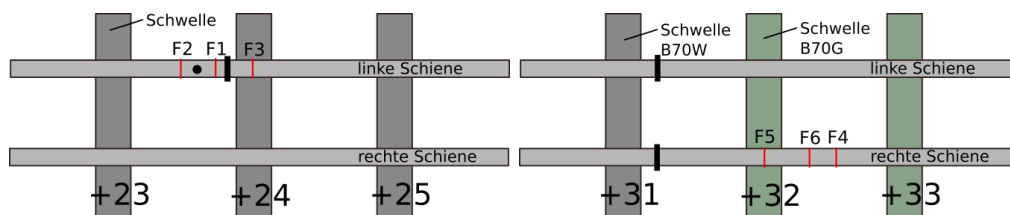


Abbildung 5.10: Positionen der vertikalen Beschleunigungsaufnehmer an der Fehlstelle 1 und 2 (Positionen von Schienenstößen sind mit einer schwarzen Linie, Lochbohrungen mit einem schwarzen Punkt markiert)

5.9 Messung der Luftschallabstrahlung bei Zugvorbeifahrten

Ziel der Luftschallmessungen war es, die Auswirkungen der Fehlstellen auch auf die Rollgeräuschabstrahlung zu erfassen. Der Messaufbau bestand neben dem Messsystem Typhoon aus zwei Mikrofonen PCB 2671, (1/2“) mit Windschutz (siehe Tabelle 3.5). Die Schalldrücke wurden zeitsynchron zu der Messung mit den Beschleunigungsaufnehmern erfasst. Es wurden nur zwei Mikrofone verwendet, da die Verwendung eines dritten Mikrofons im geforderten Abstand bei der Fehlstelle 1 aufgrund eines Gebüschs nicht möglich war. Ein Mikrofon wurde an der Referenzschwelle positioniert, das andere an der Fehlstelle 2. Dieses ist exemplarisch im Anhang in Abbildung A.7 zu sehen.

Die Mikrofonpositionen waren die in der DIN EN ISO 3095:2014 [16] empfohlenen Standardpositionen zur Messung des Luftschalls bei Vorbeifahrten von Zügen. Die Mikrofone wurden somit jeweils in einer Entfernung von 7,5 m zur Gleismitte auf einer Höhe von 1,2 m über Schienenoberkante positioniert.

Im Messbereich war ein teilweise hoher Bewuchs mit Sträuchern und Bäumen vorhanden, vor allem im Bereich der Fehlstelle 2. Dies widerspricht den Anforderungen nach DIN EN ISO 3095:2014 an die akustische Umgebung bei Vorbeifahrtmessungen [16, S.14]. Außerdem war aufgrund der weitestgehend ebenerdigen Gleislage kaum Abstand zwischen der Schienenoberkante und dem Boden. Die Ergebnisse können also nur für eine qualitative Bewertung des Luftschalls verwendet werden.

6 Ergebnisse

Im Weiteren wird zunächst auf die Ergebnisse der Messungen zur Charakterisierung des Gleises, also die Rauheitsmessungen, die Messung der Schwellenabstände, die gemessenen Mobilitäten und die Gleisabklingrate, eingegangen. Anschließend erfolgt die Auswertung der Vorbeifahrtsmessungen. Zunächst werden die Ergebnisse der schienenseitigen Messungen und im Anschluss die der fahrzeugseitigen Messungen vorgestellt.

6.1 Ergebnisse der Rauheitsmessungen

In der Auswertung der Rauheitsmessungen wird zunächst auf die Messungen am Rad eingegangen und anschließend werden die Ergebnisse der Messungen an der Schiene vorgestellt. Die Nachbearbeitung der Rohdaten aus den Messungen erfolgte bei beiden Messreihen nach DIN EN 15610:2009 [21].

6.1.1 Rauheitsmessungen am Rad

In den Abbildungen 6.1a bis 6.1b sind exemplarisch die gemittelten Terzband Rauheitspegel über die Wellenlänge für die beiden linken Räder des RailDriVe zu sehen. Die Plots beinhalten sowohl den jeweiligen Mittelwert des Rauheitspegels aus den gemessenen Spuren, wie auch die Maximum- und Minimum-Hüllkurve aus den Messdaten. Im Anhang A.16 sind die Rauheitspegel für die beiden rechten Räder zu finden.

Bei den beiden Vorderrädern handelt es sich um Werte, die durch die Mittelung der jeweils drei Messungen pro Messspur aufgezeichnet wurden. Bei den beiden Hinterrädern wurde sogar über neun Messungen gemittelt, also jeweils drei pro Messspur.

Die in den Abbildungen 6.1a, 6.1b sowie A.16a und A.16b dargestellten Hüllkurven zeigen, dass die Variationsweite der Messwerte teilweise sehr groß ist. Sie beträgt bis zu 25 dB re 1 μm (siehe Abbildung 6.1b). Dies liegt unter anderem daran, dass die Qualität der Messergebnisse von äußeren Einflüssen wie einer ausreichend starren Lagerung des Drehgestells und einem sanften Drehen der Räder während des Messvorgangs abhängig ist und somit eine gewisse Streuung der Messwerte auftritt.

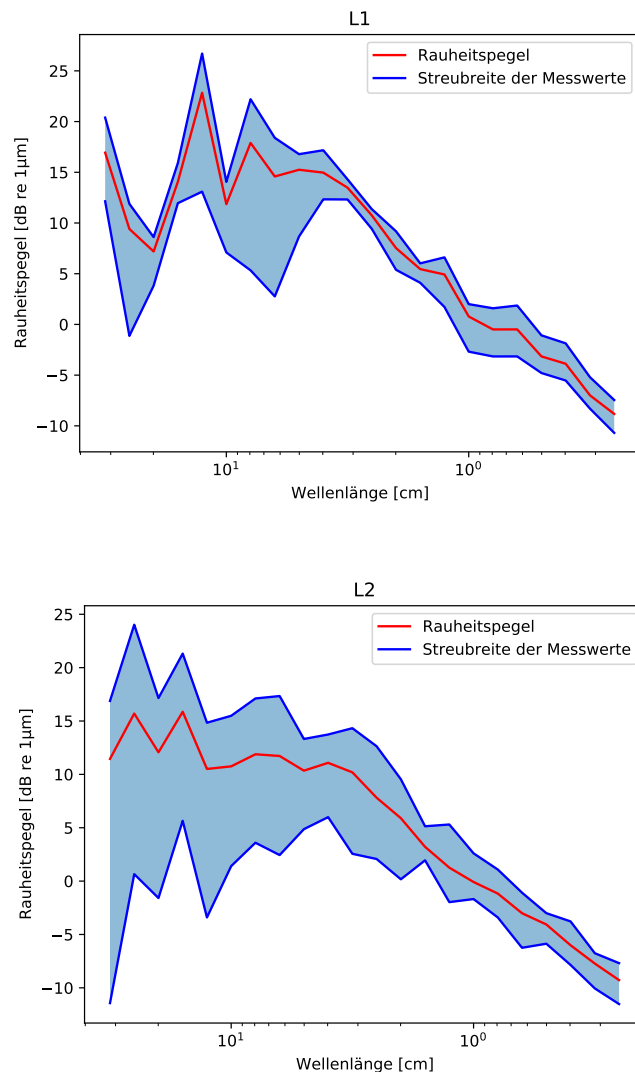


Abbildung 6.1: Gemittelte Terzband Rauheitspegel für die beiden linken Räder des RailDrive, oben: linkes Vorderrad (L1), unten: linkes Hinterrad (L2)

In Abbildung 6.2 sind die gemittelten Rauheitspegel der vier Räder im Vergleich zu sehen. Die Rauheitspegel aller vier Räder verlaufen für niedrige Wellenlängen sehr ähnlich. Für eine Wellenlänge von bis zu circa 40 cm steigen alle vier Rauheitspegel stark an. Im Bereich der Wellenlängen zwischen 40 und circa 100 cm ist diese Zunahme der Pegel gehemmter. Für höhere Wellenlänge über 100 cm wiederum schwanken die Rauheitspegel relativ stark und nehmen maximale Werte zwischen 14 und 24 dB re $1 \mu\text{m}$ an.

Die Kurvenverläufe der beiden Vorderräder, L1 und R1, weisen stärkere Schwankungen auf als die der Hinterräder. Insbesondere hat das Rad L1 für Wellenlängen von ca. 2 bis 15 cm den höchsten Rauheitspegel der vier Räder, während es für Wellenlängen über 20 cm nur

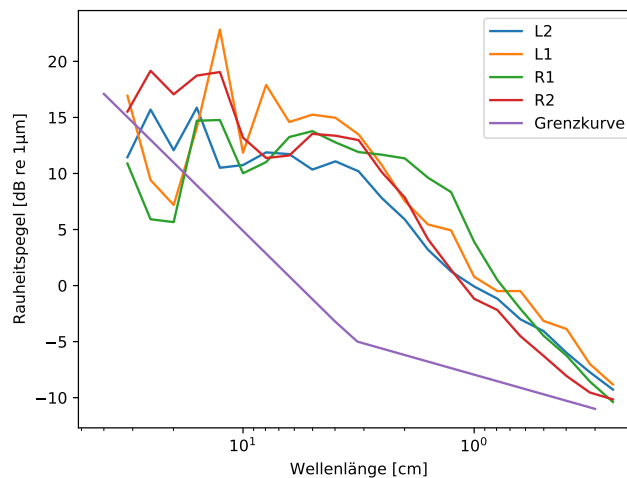


Abbildung 6.2: Gemittelte Rauheitspegel der vier Räder des RailDrive im Vergleich mit der Grenzkurve nach DIN EN ISO 3095:2014 [16]

leicht über dem Rauheitspegel von Rad R1 liegt, welches von allen vier Rädern die geringste Rauheit hat.

Die beiden Hinterräder haben zueinander qualitativ sehr ähnliche Rauheitspegel, die für Wellenlängen über 5 cm um einen Wert von ungefähr 12 dB (L2) bzw. 16 dB (R2) schwanken. Insgesamt ist das rechte Hinterrad also rauer als das linke.

Es lässt sich erkennen, dass die Vorderräder über einen weiten Wellenlängenbereich hinweg weniger rau als die hinteren Antriebsräder sind. Die Verläufe der Messspuren scheinen stark zu streuen, was auch schon während der Messung festgestellt wurde. Dies kann eventuell auf die unregelmäßige und seltene Benutzung der spurgebundenen Räder des RailDrive zurückzuführen sein.

Im Vergleich mit den Rauheitsspektren von Grauguss und K-Sohlen gebremsten Rädern sowie einem scheibengebremsten Rad und einem stark polygonisierten Rad (siehe [15, S.9]) sind die gemessenen Rauheitsverläufe sehr hoch. Die Vergleichswerte weisen mit Ausnahme des stark polygonisierten Rades einen maximalen Rauheitspegel von nur leicht über 10 dB re 1µm auf. Bei den Rädern des RailDrive gibt es auch einzelne Werte die mehr als doppelt so hoch sind. Auch die in Abbildung 6.2 gezeigte Grenzkurve der Rauheitspegel nach DIN EN ISO 3095:2014 [16] wird für fast alle Werte der Rauheitspegel aller vier Räder überschritten. Nur für Wellenlängen über circa 200 cm wird sie teilweise unterschritten.

Der Vergleich der Ergebnisse der Rauheitsmessungen mit typischen Messwerten anderer Räder zeigt, dass die Räder des RailDrive im Verhältnis eine sehr hohe Rauheit aufweisen. Dies kann auf die seltene Verwendung des RailDrive zurückzuführen sein. Die Räder sind somit nicht eingefahren.

Das Rollgeräusch eines Fahrzeuges hängt direkt mit den Rauheitsanregungen im Rad-Schiene-Kontakt zusammen (siehe Abschnitt 2.1.1). Da das RailDrive eine sehr hohe Radrauheit hat,

muss somit auch von einem höheren Emissionspegel ausgegangen werden als bei Fahrzeugrädern mit niedrigeren Rauheiten.

6.1.2 Rauheitsmessung am Gleis

In Abbildung A.15a und A.15b sind im Anhang die Messdaten des Schienenrauheitsmessgeräts zu sehen. Diese zeigen für jeden Millimeter der Messstrecke eine gemessene Auslenkung des Tasters in Mikrometerauflösung.

Der Unterschied zwischen den jeweils drei Messspuren ist bei der linken Schiene deutlich signifikanter als bei der rechten Schiene. Es wird vermutet, dass dies daran liegt, dass sich die Position der Lauffläche des Zugrades relativ zur Außenkante der Schiene innerhalb des Messbereichs ändert. Exemplarisch ist dies in Abbildung A.17 im Anhang zu sehen: während hier die Lauffläche näher zur Gleismitte liegt, verschiebt sie sich im Messbereich der linken Schiene weiter an die gegenüberliegende Außenkante der Schiene. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich eine Variation des Abstands zwischen den beiden Schienen. Die dadurch entstandene weitere Streuung der Messwerte lassen sich durch die starre Position des Tasters auf dem Messtrolley nicht verhindern.

In Abbildung 6.3 sind die Terzband Rauheitspegel der beiden Schienen über die Wellenlänge aufgetragen.

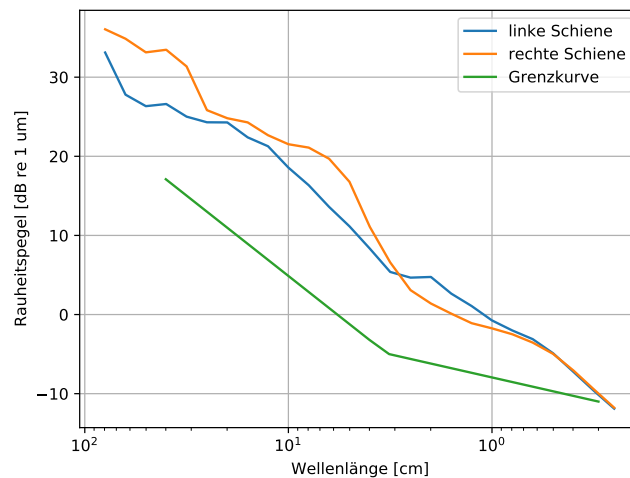


Abbildung 6.3: Vergleich der gemittelten Rauheitspegel der linken und rechten Schiene mit der Grenzkurve nach DIN EN ISO 3095:2014 [16]

In der Abbildung 6.3 ist zu erkennen, dass die rechte Schiene rauer als die linke Schiene ist. Insgesamt liegen beide Rauheitsspektren deutlich über dem oberen Grenzspektrum des Pegels der akustischen Schienenrauheit nach DIN EN ISO 3095:2014 [16, S.18]. Die allgemeinen Rauheitsprofile der beiden Gleise unterscheiden sich jedoch nicht charakteristisch von anderen Rauheitspegeln aus der Literatur, so stimmen die Verläufe weitestgehend mit der akustischen

Rauheit einer Schiene hoher Rauheit in [15, S.10] überein, auch wenn die hier gemessenen Werte noch über dem dort angegebenen Pegel liegen.

Um die gemessenen Schienenrauheiten besser bewerten zu können, wurde zur Klassifizierung der Schienenrauheit ein Rauheits-Einzahlwert $L_{\lambda,CA}$ nach Gleichung 2.6 berechnet. Der A-Bewertungspegel A_{bew} wird durch eine lineare Interpolation bestimmt unter Wahl einer Bezugsgeschwindigkeit von $v = 25 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, um die Wellenlängenspektren in Frequenzspektren umzurechnen.

Für das betrachtete Gleis ergibt sich für die rauere rechte Schiene nach Gleichung 2.6 somit ein Rauheitspegel von 23,5 dB und für die linke Schiene ein Pegel von 20,7 dB.

Der Gleiszustand kann also nach dem von Thron in [22] vorgestellten Emissionsmodell bezogen auf die Rauheit als besonders schlecht klassifiziert werden. Da das Gleis am Hafen nur von Rangierloks und Güterzügen bei niedrigen Geschwindigkeiten befahren wird, ist dies nicht weiter überraschend, da eine aufwendige Instandhaltung und regelmäßiges Schienenschleifen auf der Strecke nicht zwingend notwendig sind.

6.2 Schwellenabstände

Der mittlere Schwellenabstand im betrachteten Messbereich beträgt ca. 0,654 m mit einer Standardabweichung von 2,4 %. Es gibt einzelne Abstände zwischen den Schwellen von über 0,7 m und auch im Vergleich geringe Abstände von nur 0,6 m.

Der größte Schwellenabstand wurde zwischen den Schwellen +24 und +25 an der linken Schiene gemessen. Er beträgt 0,759 m. Ein weiterer Bereich mit sehr großen Schwellenabständen ist im Bereich der Fehlstelle 2. Hier wurden zwischen den Schwellen +31 und +32 an der linken Schienenseite Abstände von 0,757 m und auf der rechten Schienenseite von 0,750 m gemessen. Es handelt sich hierbei um den Bereich, wo unter anderem der Schwellenwechsel stattfindet. Außer diesem auffällig großen Abstand ist keine systematische Änderung der Schwellenabstände nach Änderung der verbauten Schwellenart erkennbar.

Es liegen stets kleine Unterschiede zwischen der linken und rechten Schiene vor, diese sind jedoch nicht systematisch und gleichen sich im Mittel gegenseitig aus.

Die Schwellenabstände im Messbereich sind in ihrer Regelmäßigkeit gut mit Werten aus der Literatur vergleichbar, so ist die an der Teststrecke gemessene Standardabweichung von unter 16 mm bei einem mittleren Abstand von 0,654 m deutlich gleichmäßiger als die mittlere Standardabweichung von 39 mm bei einem mittleren Abstand von 0,628 m für neu verlegte Gleise, siehe [3, S.74].

6.3 Steifigkeitsmessungen

Das Antwortverhalten der Schiene auf Hammerimpulse mit dem kleinen Impulshammer im Bereich um die Referenzschwelle ist exemplarisch in Abbildung 6.4 zu sehen. Dort ist der Frequenzverlauf der Mobilität für den Messpunkt in der Schwellenmitte zwischen Schwelle 0 und +1 abgebildet. Die abgebildete Mobilität ist der Mittelwert aus drei Messungen, die wiederum

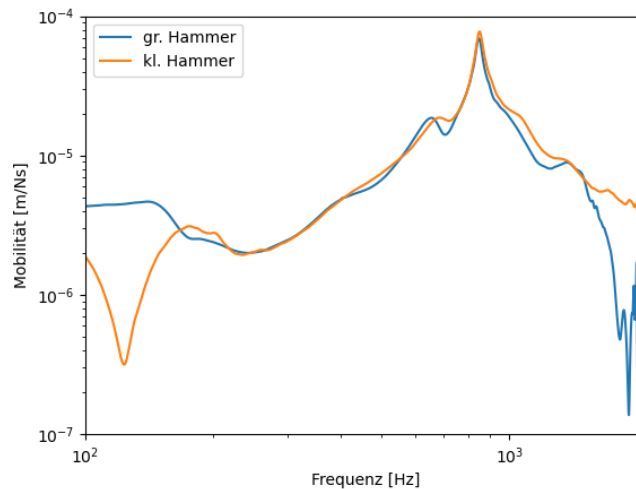


Abbildung 6.4: Vergleich des Frequenzverlaufs des Absolutwertes der Mobilität der rechten Schiene gemessen in der Schwellenmitte zwischen Schwelle 0 und +1 mit dem kleinen und großen Impulshammer

jeweils aus sechs Messungen von einzelnen Impulsschlägen bestehen. Die Datenverarbeitung erfolgte wie in Abschnitt 3.6 beschrieben. Es werden nur Frequenzen bis 2 kHz betrachtet, da sich oberhalb dieses Frequenzbereichs in der Schiene höhere Eigenmoden ausbreiten.

In Abbildung 6.4 ist die Mobilität der Schiene, gemessen an der Schwellenfachmitte des Referenzschwellenfachs, zu sehen. Sie wurde sowohl mit dem kleinen als auch mit dem großen Impulshammer gemessen. Bei den Messungen mit beiden Impulshammern ist ein dominanter Peak bei circa 850 Hz zu sehen. Dieser ist bei beiden Messungen gleich stark ausgeprägt. Die Abbildung gibt einen guten Einblick in das dynamische Verhalten der Schiene. Der Peak bei etwa 850 Hz entspricht wahrscheinlich der *pinned-pinned*-Frequenz des Systems (siehe Abschnitt 2.2).

Im Vergleich mit Schienen aus der Literatur ist diese Frequenz relativ niedrig. So tritt die *pinned-pinned*-Frequenz oft erst knapp unter 1000 Hz auf [3, S.30 ff.]. Dies kann mit dem Gewicht je Länge der Schiene zusammenhängen, da die untersuchte Schiene relativ leicht war. Im tieffrequenten Bereich ist ein weiterer, wenn auch weniger dominanter Peak bei ca. 600 Hz zu sehen. Wahrscheinlich entspricht dieser der Resonanz der Schienenmasse auf den Zwischenlagen-Steifigkeiten [3, S.30 ff.]. Der Peak ist gefolgt von einem leichten Einbruch bei etwa 700 Hz.

Im hochfrequenten Bereich über 1500 Hz zeigen die Messwerte bei Anregung mit dem großen Impulshammer starke Schwankungen. Es ist zu vermuten, dass in diesem Frequenzbereich nicht ausreichend Energie mit dem Hammer eingebracht wurde. Für den entsprechenden Frequenzbereich lassen sich deshalb bessere Rückschlüsse auf die Steifigkeit des Systems aus den Messungen mit dem kleinen Impulshammer gewinnen.

In der Abbildung 6.5 ist der Frequenzverlauf der Mobilitäten der rechten Schiene, gemessen

direkt an den Schwellen 0 und +1 mit dem kleinen Impulshammer zu sehen. Die gezeigten Verläufe sind hierbei jeweils die Mittelwerte aus sechs Messungen von Einzelimpulsen.

Abbildung 6.5 zeigt, dass die gemessene Amplitude an der *pinned-pinned*-Resonanz über der

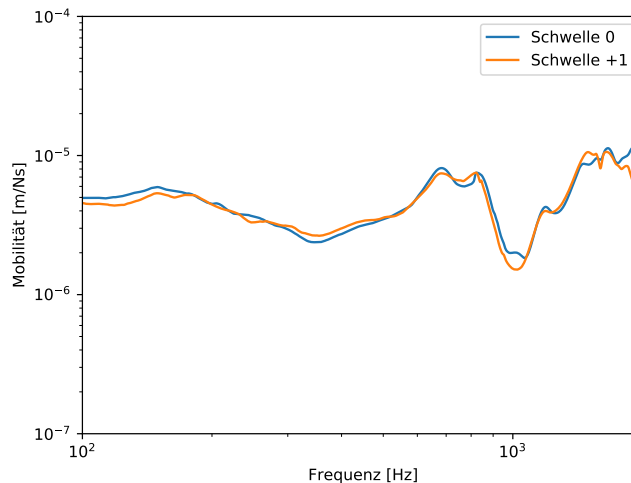


Abbildung 6.5: Vergleich der Frequenzverläufe der Absolutwerte der Mobilität der rechten Schiene, gemessen an der Schwelle 0 und +1 mit dem kleinen Impulshammer

Schwelle weniger ausgeprägt ist. Dies liegt daran, dass an der Schwelle stets ein Wellenbauch dieser Resonanz ist. Die Resonanz der Padsteifigkeiten, die auch zuvor bereits in Abbildung 6.4 bei etwa 600 Hz identifiziert wurde, tritt auch hier auf. Im hochfrequenten Bereich treten hier für beide Messungen mehrere Peaks, bei circa 1100 Hz, 1600 Hz und 1700 Hz auf.

In Abbildung 6.6 sind die Mobilitäten an den Schwellenmitten um die Fehlstelle 1 zu sehen. Es handelt sich um drei Messungen, die vor, an und nach der Fehlstelle erfolgten, also an den jeweiligen Schwellenmitten im Bereich der Schwelle +23 bis +26, siehe Abbildung 5.7. Im tieffrequenten Bereich bis zur *pinned-pinned*-Frequenz ist die Mobilität an der Messposition +23 + 1/2 am höchsten, danach kommt die Mobilität an der Fehlstelle selbst. Den niedrigsten Verlauf hat die Mobilität an der Messposition +25 + 1/2. Bei allen drei Messpositionen ist die Resonanz bei etwa 600 Hz zu sehen, aber der Sperrbereich bei ca. 700 Hz ist bei der Messposition +24 + 1/2 nicht sehr deutlich. Auch ist auffällig, dass die *pinned-pinned*-Frequenz selbst unterschiedlich stark ausgeprägt ist bei den drei Schwellenmitten. Sie schiebt sich in positiver Fahrtrichtung für die drei Messpunkte immer einige Hertz weiter in höhere Frequenzen. Für die Abhängigkeit der *pinned-pinned*-Frequenz vom Schwellenabstand gilt, dass je weiter der Abstand, desto tiefer prägt sich die *pinned-pinned*-Frequenz aus. Da hier jedoch der Schwellenabstand zwischen Schwelle +24 und +25 mit 0,759 m besonders groß ist und die beiden anderen Schwellenabstände geringer sind, müssen die Messergebnisse anderweitig beeinflusst werden. Die Gründe hierfür konnten nicht endgültig geklärt werden. Davon abgesehen sind im Vergleich mit den Mobilitäten am guten Schwellenfach, siehe

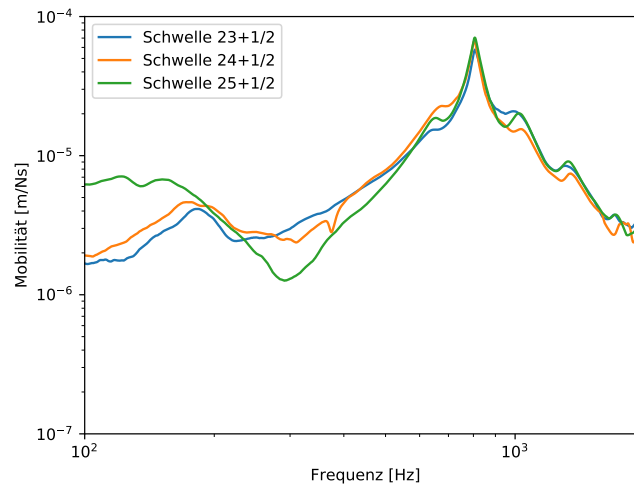


Abbildung 6.6: Vergleich der Frequenzverläufe der Absolutwerte der Mobilität der linken Schiene, gemessen an den Schwellenmitten im Bereich der Schwellen +23 bis +26 an der Fehlstelle 1 mit dem kleinen Impulshammer

Abbildung 6.4, keine systematischen Unterschiede erkennbar.

In Abbildung 6.7 sind die gemessenen Mobilitäten an den Schwellen um die Fehlstelle 2 zu sehen. Es handelt sich um drei Messungen, die vor, an und nach der Fehlstelle erfolgten. Also an den Schwellen +31, +32 und +33. Die Messpositionen sind auch hier der Abbildung 5.7 zu entnehmen.

Im Gegensatz zu den Mobilitäten in Abbildung 6.5, deren Messungen am guten Schwellenfach ebenfalls über der Schwelle erfolgten, ist hier eine deutlich größere Streuung der Messwerte zu sehen. Die Mobilitäten an der Fehlstelle 2 sind im Allgemeinen alle höher als die an dem guten Schwellenfach und zeigen speziell im hochfrequenten Bereich einige Peaks. Es lassen sich jedoch keine Regelmäßigkeit in den Peaks der Mobilitäten feststellen. Auffällig ist, dass die Messung an der Schwelle 32 die höchsten Werte liefert, an dieser Schwelle fand auch der Schwellenwechsel statt. Eine Vermutung ist, dass an der Schweißnaht sowie durch den Schwellenwechsel hier verschiedene Unstetigkeiten auftreten, die die Mobilitäten beeinflussen.

Mit Hilfe der Hammerimpulsmessungen konnte gezeigt werden, dass die Fehlstelle 2 einen starken Einfluss auf die Steifigkeit und somit die Impulsantwort der Schiene hat. Dies ist nur in geringem Maße auch bei der Fehlstelle 1 zu erkennen. Resonanzfrequenzen wie die *pinned-pinned*-Frequenz sind im ganzen Messbereich weitestgehend konstant und weichen nur direkt an den Fehlstellen teilweise leicht ab.

Um den Einfluss der diversen Schienenstöße und Lochbohrungen im Messbereich systematisch zu untersuchen, wären jedoch weitere Messungen notwendig. Vorerst kann jedoch festgehalten werden, dass diese Unterschiede existieren und somit auch bei den weiteren Messungen,

6.3 Steifigkeitsmessungen

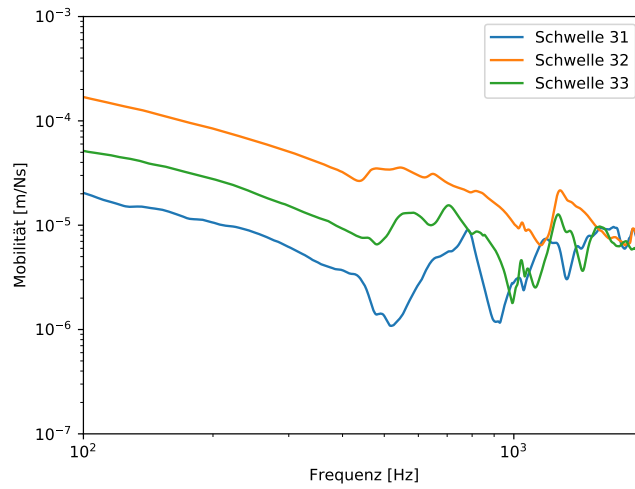


Abbildung 6.7: Vergleich der Frequenzverläufe der Absolutwerte der Mobilität der rechten Schiene, gemessen an den Schwellen +31 bis +33 an der Fehlstelle 2 mit dem kleinen Impulshammer

insbesondere bei den Fahrzeugüberfahrten, einen Einfluss spielen sollten.

6.4 Gleisabklingrate

Die Gleisabklingrate wurde aus den Messdaten nach DIN EN 15461:2011 [26] berechnet. Es wurden jeweils drei TDRs für benachbarte Schwellenfächer gemessen. Da diese keine signifikanten Unterschiede zueinander aufweisen und die geringen Abweichungen mit üblichen Messungenauigkeiten zu erklären sind, wird im Weiteren nur die TDR des mittleren Schwellenfachs (jeweils Messung B, siehe Abschnitt 5.6) betrachtet. Die TDR aus dieser Messung ist in Abbildung 6.8 sowohl für das linke wie auch für das rechte Gleis zu sehen. Im Anhang A.2 sind ergänzend die vergleichenden Abbildungen der ausgewerteten TDR-Messungen für beide Schienen bezogen auf die drei benachbarten Schwellenfächer und die berechneten TDRs aus Messungen mit dem kleinen und großen Impulshammer im Vergleich zu finden.

Die Kurven beider Abklingraten in Abbildung 6.8 steigen bis zu einer Frequenz von ca. 520 Hz, wo sie ihr Maximum von ca. 25 dB/m erreichen. Anschließend sinken die Werte wieder auf einen Wert von 5 dB/m bei etwa 800 Hz, gefolgt von einem erneuten leichten Anstieg auf Werte um die 10 dB/m bei 1300 Hz. Anschließend nimmt die Abklingrate stetig ab. Zwischen den beiden Gleisen ist in der Abbildung kein größerer Unterschied zu erkennen, auch, wenn die Werte bei dem zweiten Anstieg für die rechte Schiene leicht höher sind.

Bei dem Tiefpunkt der Kurvenverläufe bei circa 850 Hz handelt es sich um die *pinned-pinned*-Frequenz, in dieser Frequenz kommt es durch die Schienenlagerung kaum zu einer Pegelabnahme über die Balkenlänge, die Biegewelle kann sich also fast ungehindert ausbreiten. Die Frequenz an der dieser starke Abfall der TDRs auftritt, ist auch von der Steifigkeit der Schienenaufgabe abhängig [3, S.36]

Die gemessenen TDRs liegen deutlich über dem unteren Grenzspektrum der Gleisabklingraten nach DIN EN ISO 3095:2014 [16, S.19]. Nur für hohe Frequenzen von über 1800 Hz wird diese leicht unterschritten. Dies lässt darauf schließen, dass Anregungen an der Schiene schnell abklingen. Eine Vermutung ist, dass dies durch den geringen Zugverkehr im Messabschnitt und die resultierende geringe Beanspruchung der Zwischenlagen zu begründen ist, die sich somit in einem guten Zustand befinden.

Durch die relativ hohen gemessenen TDRs, klingen auch die Anregungen an den Fehlstellen vermutlich schnell ab. Die Einflüsse der Fehlstellen sind somit örtlich begrenzt beobachtbar und beeinflussen sich nicht gegenseitig, da ihr Abstand wahrscheinlich groß genug ist.

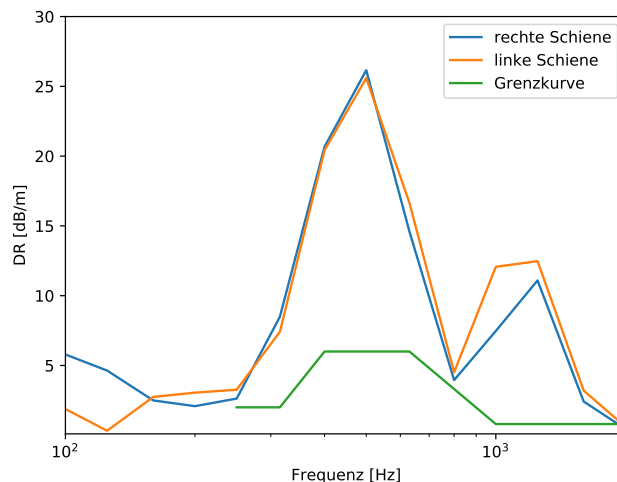


Abbildung 6.8: Vergleich der Terzbandspektren der vertikalen TDRs, gemessen in positive Richtung mit dem kleinen Impulshammer am linken und rechten Gleis unter Angabe der unteren Grenzkurve nach [16]

6.5 Schwingverhalten der Schiene bei Zugvorbeifahrten

Während der Fahrzeugüberfahrten wurde an verschiedenen Positionen an der Schiene das Schwingverhalten mit Beschleunigungsaufnehmern gemessen (siehe Abschnitt 5.8). In Abbildung 6.9 sind die zugeschnittenen Zeitdaten des Beschleunigungsaufnehmers R7 bei einer solchen Überfahrt für das RailDriVe und die Lok zu sehen. Beide Überfahrten fanden in positiver Fahrtrichtung entsprechend Abbildung 3.1 statt. Dies bedeutet, dass die Vorderräder als erstes über die Messposition der entsprechenden Aufnehmer führen.

Die im Weiteren verwendeten Geschwindigkeitsangaben entsprechen der Auswertung der Messungen mit den Lichtschranken (siehe Tabelle A.2) und nicht den weniger genauen fahrzeugeigenen Geschwindigkeitsanzeigen.

Die Anregung durch das RailDriVe ist in der Abbildung 6.9 deutlich stärker, allerdings lag die Überfahrtsgeschwindigkeit 5,4 km/h über der Geschwindigkeit der Lok. Davon abgesehen sind die Messdaten sehr ähnlich. Bei beiden Fahrzeugen sind deutlich die beiden Radachsen zu erkennen.

Insbesondere bei den Überfahrten des RailDriVe treten im Zeitintervall der Messung vereinzelt stark ausgeprägte Peaks in den Messdaten auf. Diese sind beispielsweise in Abbildung 6.9 bei der Überfahrt der ersten Radachse des RailDriVe zu erkennen. Auch in den Messdaten der Lok sind diese gelegentlich zu erkennen. Auf deren vermutliche Ursachen wird im Weiteren noch eingegangen. Sie könnten sie beispielsweise durch die Antriebsmechanismen der Lok oder kleinere Schienenfehler entstanden sein. Um diese nicht systematisch auftretenden Streuungen in den Messdaten zu reduzieren, werden im Weiteren sowohl für die Lok als auch für das RailDriVe stets Mittelwerte aus mehreren, jedoch stets mindestens zwei Überfahrten

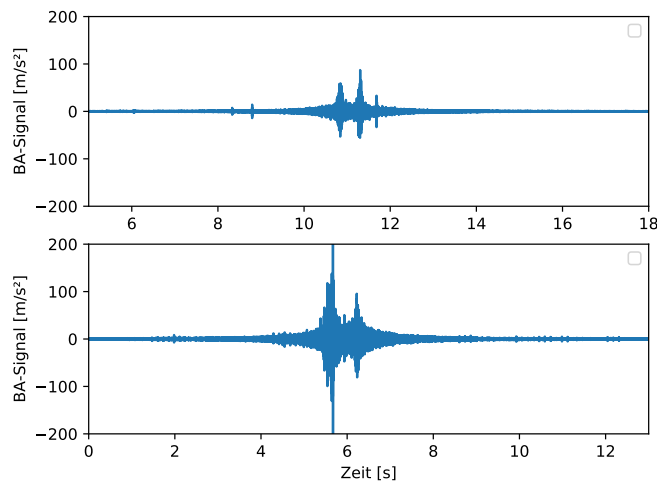


Abbildung 6.9: Zeitdaten des Beschleunigungsaufnehmers R7 bei Überfahrten mit der Lok (oben, 18,7 km/h) und dem RailDriVe (unten, 22,5 km/h) in positiver Fahrtrichtung, rechte Schiene

verwendet.

6.5.1 BDS im Referenzschwellenfach

Das Beschleunigungsdichtespektrum (BDS) der Schiene ist gut geeignet, um den Beitrag der Schiene zum Gesamtrollgeräusch zu bestimmen. In Abbildung 6.10 sind die BDS aus den Zugvorbeifahrtmessungen für den Beschleunigungsaufnehmer R7 für die Lok und das RailDriVe dargestellt. Die genauen Positionen der verwendeten Beschleunigungsaufnehmer sind in Abbildung 5.9 zu sehen und in Tabelle 5.2 nachzulesen. R7 befindet sich in der Mitte zwischen Schwelle 0 und 1 am Schienenfuß.

Bei dem BDS der Lok in Abbildung 6.10 ist sehr auffällig, dass der tieffrequente Bereich deutlich höher als der hochfrequente Bereich ist. Dies ist mit der hohen Masse der Lok zu erklären, die ein Gewicht von 40 t hat. Dieses Gewicht wird auf nur vier Räder verteilt und überträgt sehr viel Energie in die Schiene, vor allem im tieffrequenten Bereich. Es kann durch das hohe Gewicht von einer größeren Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene ausgegangen werden (siehe Abschnitt 2.2), sodass eventuell sogar sehr hochfrequente Rauheiten zu klein für diese Kontaktfläche sind und durch den Kontaktfiter nicht mehr berücksichtigt werden. Alternativ ist die starke Anregung im tieffrequenten Bereich eventuell auch mit den Antriebsgeräuschen der Lok zu erklären.

Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Radrauheit der Lok unbekannt ist. Sollte diese langwellig sein, wäre auch dies eine Erklärung für die tieffrequente Anregung.

Das deutlich leichtere RailDriVe hat nur ein Gewicht von unter 20 % des Gewichts der Lok. Im BDS ist auffällig, dass hier mehr hochfrequente Anteile übertragen werden und der Pegel

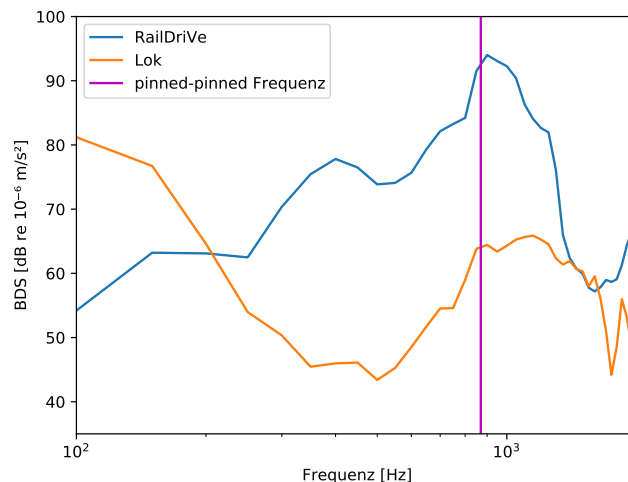


Abbildung 6.10: BDS bei Überfahrten mit der Lok (durchschnittlich 24,1 km/h) und dem RailDrive (durchschnittlich 29,5 km/h) in positiver Fahrtrichtung und Maximalgeschwindigkeit gemessen am Beschleunigungsaufnehmer R7 in Schwellenfachmitte

des RailDrive sogar allgemein deutlich höher ist.

Trotz der Verschiebung ins Tieffrequente bei der Lok ist in Abbildung 6.10 bei beiden Fahrzeugen der Einfluss der *pinned-pinned*-Frequenz ersichtlich. Insbesondere bei dem RailDrive ist diese als auffälliger Peak zu erkennen. Dieser liegt wie nach den Mobilitätsdaten aus Abbildung 6.4 auch zu erwarten ist, bei einer Frequenz von etwa 850 Hz.

In Abbildung 6.11 sind die BDS des Aufnehmers R3 zu sehen. Dieser Beschleunigungsaufnehmer befand sich ebenfalls auf der rechten Schiene, jedoch direkt über der Schwelle mit der Nummer 0. Seine Position ist in Abbildung 5.9 skizziert.

Im Vergleich mit der Abbildung 6.10 ist hier zu sehen, dass die *pinned-pinned*-Frequenz wie zu erwarten nicht als Peak auftritt. Stattdessen ist bei 850 Hz ein Sperrbereich zu sehen. Dies liegt an dem Knotenpunkt der *pinned-pinned*-Frequenz an der Messposition über der Schwelle und wurde bereits im Abschnitt 6.3 erklärt.

Bei den geringen Überfahrtsgeschwindigkeiten von unter 30 km/h sind die Daten des RailDrive mit einer geringeren Masse näher an Vergleichswerten aus der Literatur, wo normalerweise deutlich höhere Zuggeschwindigkeiten verwendet werden. Es kann bei den durchgeführten Messungen deshalb davon ausgegangen werden, dass die Überfahrten mit dem RailDrive geeigneter sind, um den Einfluss der Fehlstellen zu untersuchen, da hier auch hochfrequente Anteile übertragen wurden.

So sind im BDS des RailDrive sowohl in Abbildung 6.10 wie auch in Abbildung 6.11 eine Resonanz bei 400 Hz und Sperrbereiche zwischen 200 und 300 Hz sowie 500 und 600 Hz zu sehen. Diese entsprechen in etwa den Durchlass- bzw. Sperrbereichen der TDR (siehe Abschnitt 6.4).

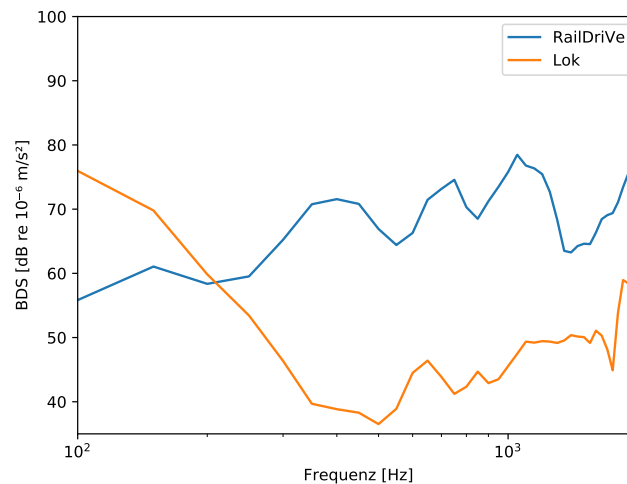


Abbildung 6.11: BDS bei Überfahrten mit der Lok (durchschnittlich 24,1 km/h) und dem RailDriVe (durchschnittlich 29,5 km/h) in positiver Fahrtrichtung und Maximalgeschwindigkeit gemessen am Beschleunigungsaufnehmer R1 über der Schwelle

Bei der Lok sind diese Resonanzfrequenzen wahrscheinlich durch die starke tieffrequente Anregung nicht in diesem Maße angeregt.

Bei der bisherigen Auswertung des Schwingverhaltens der Schiene bei Zugüberfahrten wurde sich auf die rechte Schiene beschränkt, da sich bei Überfahrten der linken Schiene in positiver Richtung mit dem RailDriVe wiederholt Beschleunigungsdichtespektren mit im Vergleich überdurchschnittlich hohen Werten einstellten. Das ist exemplarisch in Abbildung 6.12 für drei Beschleunigungsaufnehmer am guten Schwellenfach zu sehen.

Bei Überfahrten in negativer Fahrtrichtung konnte dieses Verhalten nicht beobachtet werden. Die Auffälligkeit in den Messwerten ist aber bei fast allen Beschleunigungsaufnehmern an der linken Schiene bei positiven Überfahrten mit dem RailDriVe aufgetreten.

Eine Vermutung für dieses Ergebnis ist, dass durch die geringe Spurweite im Messbereich (siehe Kapitel 3.1) der Radkranz bei Überfahrten an der Schiene anläuft. Dies würde zu einer zusätzlichen lateralen und vertikalen Teilanregung des Systems führen und die hohe in das System eingebrachte Energie erklären. Alternativ ist auch eine Querverdrehung der Schienen zueinander denkbar, sodass ein Höhenunterschied zwischen den beiden Schienen entsteht. Es konnte jedoch nicht geklärt werden, warum diese Messeinflüsse bei allen Überfahrten des guten Schwellenfachs stets an der linken Schiene und nur in positiver Fahrtrichtung auftraten und inwieweit dies mit einer eventuellen Beeinflussung des Sinuslaufes des Rades auf der Schiene durch dortige Auffälligkeiten zusammenhängt. Deshalb wurde sich auf die rechte Schiene als Referenz für die weiteren Auswertungen beschränkt.

Zusammengefasst konnten aus den Vorbeifahrtmessungen am guten Schwellenfach die bereits im Abschnitt 6.3 vorgestellten Resonanzfrequenzen des Systems weitestgehend bestä-

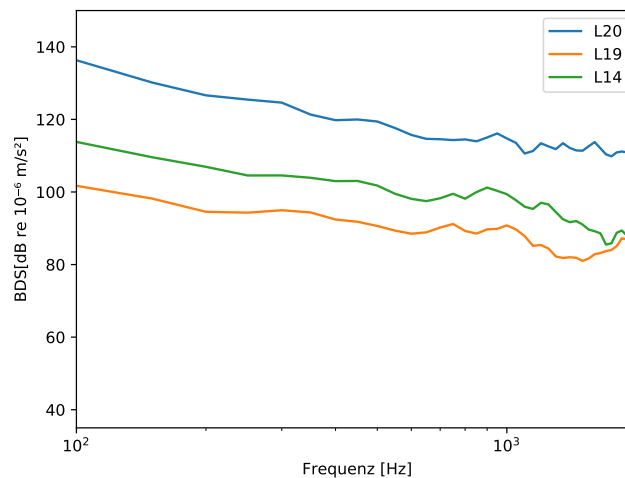


Abbildung 6.12: BDS bei Überfahrten mit dem RailDriVe bei durchschnittlich 29,5 km/h in positiver Fahrtrichtung, linke Schiene, gemessen an den Beschleunigungsaufnehmern L14, L19 und L20

tigt werden. So ist die Resonanz bei 850 Hz auch bei Überfahrtsmessungen sehr deutlich zu erkennen. Eine weitere Resonanz tritt bei etwa 400 Hz auf.

6.5.2 Vergleich mit den Fehlstellen

Um eine Übersicht über die Einflüsse der Fehlstellen auf das Schwingverhalten der Schiene zu geben, wird nun nacheinander auf die beiden betrachteten Fehlstellen am Gleis eingegangen. Es wird sich zunächst auf die negative Fahrtrichtung beschränkt.

Als Referenz wird in den Abbildungen im Vergleich jeweils ein Beschleunigungsaufnehmer an einer äquivalenten Schienenposition aus dem guten Schwellenfach, rechte Schiene, verwendet. Hierbei handelt es sich um die Aufnehmer R1 und R7 aus dem vorherigen Abschnitt sowie den Aufnehmer R3. Die Positionen dieser Aufnehmer am Referenzschwellenfach sind wieder der Abbildung 5.9 zu entnehmen.

Die Position der Fehlstelle 1 in Bezug auf die Positionen der Beschleunigungsaufnehmer ist in Abbildung 5.10 zu sehen. So wird bei einer Überfahrt in positiver Richtung zunächst der Aufnehmer F2 in Schwellenfachmitte, dann die Lochbohrung, anschließend der Aufnehmer F1, dann die Schweißnaht und zum Abschluss die Schwelle 24 mit dem Aufnehmer F3 passiert. In Abbildung 6.13 sind die BDS des RailDriVe für die Aufnehmer im Bereich der Fehlstelle 1 zu sehen. Es sind jeweils die BDS der Beschleunigungsaufnehmer an den unterschiedlichen Schienenpositionen zusammen mit der äquivalenten Referenz (Position und Fahrtrichtung) vom guten Schwellenfach abgebildet.

Die Verläufe der BDS von Aufnehmer F1 und F2 sind sich sehr ähnlich. Aber nur bei dem

6 Ergebnisse

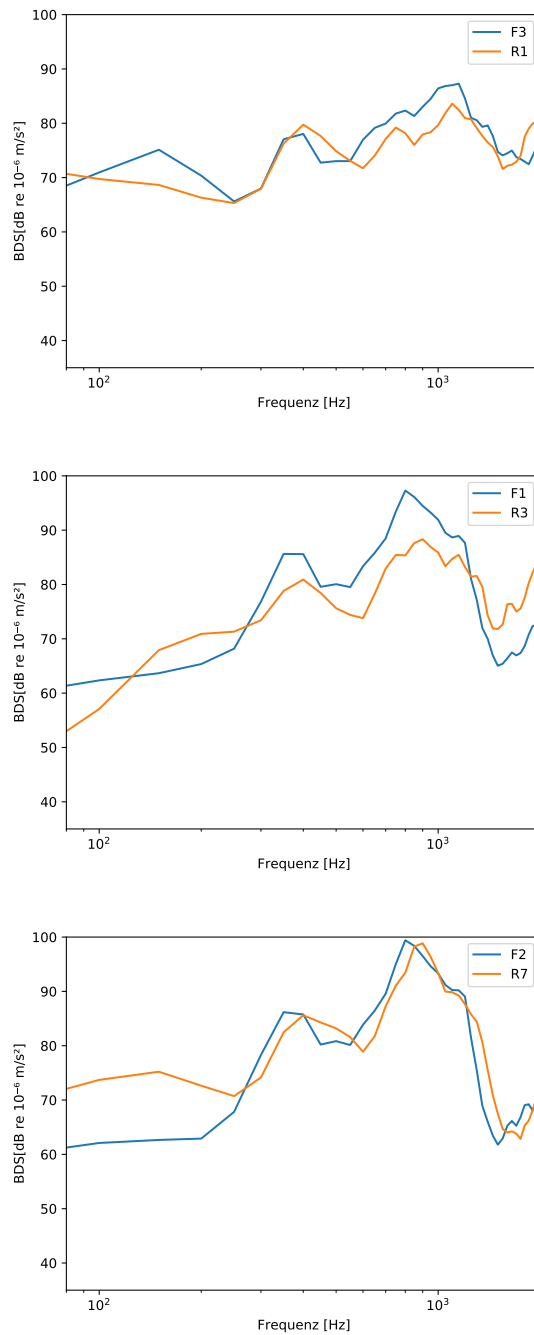


Abbildung 6.13: BDS bei Überfahrten mit dem RailDrive bei durchschnittlich 30,1 km/h in negativer Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 1 (linke Schiene) und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach (rechte Schiene)

Aufnehmer F1 ist auch ein systematischer Unterschied zur Referenz am guten Schwellenfach zu erkennen. Für Frequenzen im Bereich von etwa 250 Hz bis zur *pinned-pinned*-Frequenz ist das BDS für diesen Aufnehmer durchgehend höher als die jeweilige Referenz. Bei den Resonanzfrequenzen zwischen 300 und 400 Hz sowie an der *pinned-pinned*-Frequenz selbst beträgt der Unterschied sogar jeweils um die 10 dB mehr als bei dem Referenzaufnehmer R3. Das BDS des Aufnehmers F2 ist im tieffrequenten Bereich niedriger als die Werte des Referenzschwellenfachs.

Bei allen drei BDS an der Fehlstelle 1 ist eine weitere Resonanzfrequenz bei ca. 1100 Hz erkennbar. Diese ist an allen drei Aufnehmern F1, F2 und F3 stets etwas stärker ausgeprägt als die jeweilige Referenz. Für Frequenzen über dieser Resonanz folgt an der Fehlstelle 1 an den Aufnehmern F2 und F3 außerdem ein deutlich ausgeprägter Sperrbereich als am Referenzschwellenfach.

Für den Aufnehmer F3 über der Schwelle sind in Abbildung 6.13 die Unterschiede zum Referenzaufnehmer R1 nicht sehr groß. Hier kann jedoch eine tieffrequente Resonanz etwas unter 200 Hz erkannt werden, die bei der Referenzschwelle bisher nicht in Erscheinung trat.

Diese Resonanzfrequenz ist auch bei den BDS der Lok in Abbildung 6.14 deutlich für alle Aufnehmer an der Fehlstelle zu sehen. Davon abgesehen ist das Verhältnis der Referenzaufnehmer zu den Aufnehmern an der Fehlstelle auch für die Lok ähnlich wie beim RailDrive. Auffällig ist, dass alle drei Aufnehmer an der Fehlstelle 1 für den gesamten Frequenzbereich (bei F1 und F2 nur bis zu dem Sperrbereich nach der *pinned-pinned*-Frequenz) stets Werte deutlich über den Referenzaufnehmern bei Überfahrten mit der Lok gemessen haben. In vielen Frequenzbereichen beträgt dieser Unterschied circa 10 dB, erreicht bei F3 aber auch Werte von über 20 dB.

Im Anhang sind in Abbildung A.9 die BDS für die Fehlstelle 1 bei positiver Fahrtrichtung zu sehen. Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert, tritt auch hier die beschriebene Messauffälligkeit auf. So sind in den BDS keine Einflüsse von Resonanzfrequenzen ersichtlich.

Ebenfalls im Anhang sind der Vollständigkeit halber in Abbildung A.10 auch die BDS für die Fehlstelle 1 bei positiver Fahrtrichtung mit der Lok zu sehen. Hier stimmen die Beobachtungen mit denen zur negativen Fahrtrichtung überein. Nur die Unterschiede zwischen der Referenz und der Fehlstelle fallen quantitativ nicht so hoch aus und betragen maximal 10 dB.

Bei einer Überfahrt der Fehlstelle 2 in positiver Fahrtrichtung erfolgt zunächst nach der Schwelle +31 ein Schienenstoß und auch der Schwellenwechsel. Der erste Aufnehmer, F5, wird an der Schwelle 32 passiert, gefolgt von F6 und anschließend F4 in der Schwellenfachmitte. Zu sehen sind die Positionen der Beschleunigungsaufnehmer in Abbildung 5.10.

Die entsprechenden Daten sind in Abbildung 6.15 zu sehen.

Für den Aufnehmer F4 in der Schwellenfachmitte werden im tieffrequenten Bereich bis zur deutlich ausgeprägten *pinned-pinned*-Frequenz Werte von mindestens 5 dB über dem Referenzaufnehmer gemessen.

Außerdem liegt das Maximum der *pinned-pinned*-Resonanz etwas tieffrequenter als bei der Referenz am guten Schwellenfach.

Die Daten des Aufnehmers F5 und F6 ähneln sich hier sehr in ihren Verläufen. Sie liegen auch stets deutlich über der jeweiligen Referenz, haben zu dieser aber insbesondere im tieffrequenten

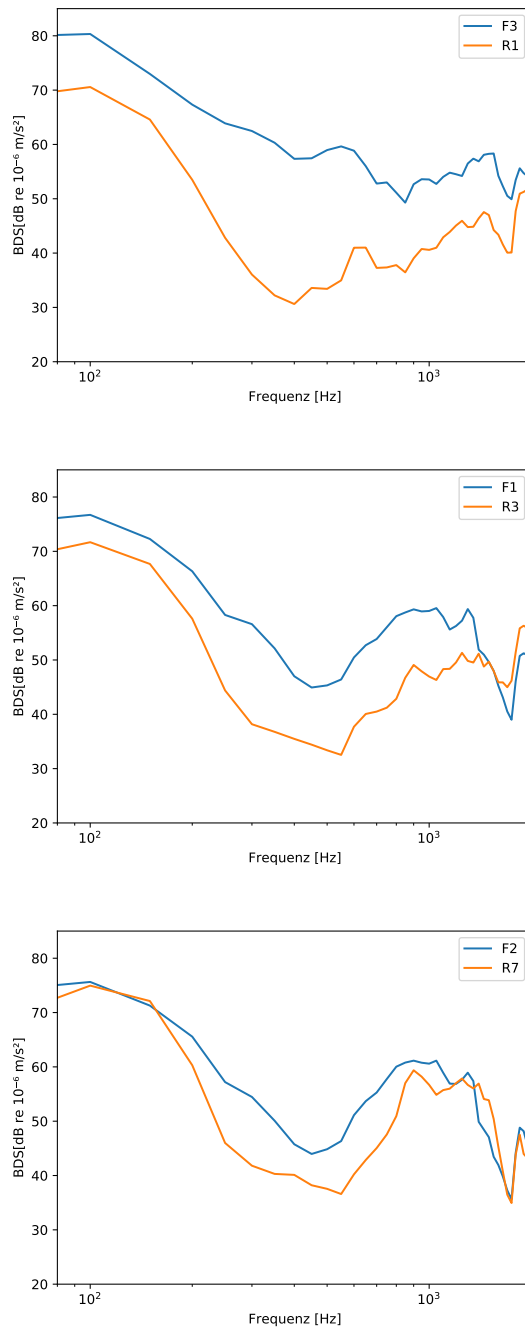


Abbildung 6.14: BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 24,6 km/h in negativer Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 1 (linke Schiene) und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach (rechte Schiene)

6.5 Schwingverhalten der Schiene bei Zugvorbeifahrten

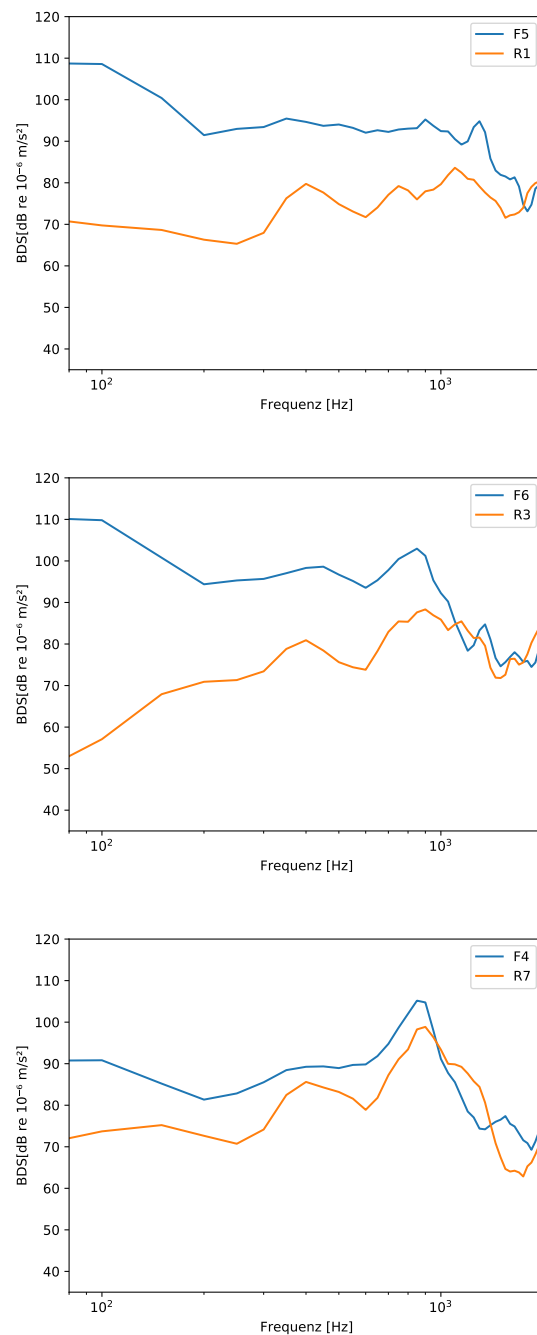


Abbildung 6.15: BDS bei Überfahrten mit dem RailDrivE bei durchschnittlich 30,1 km/h in negativer Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 2 (rechte Schiene) und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach (rechte Schiene)

Bereich eine Differenz von sogar bis zu 40 dB. Während bei F5 die *pinned-pinned*-Frequenz wie auch bei der Referenzschwelle nicht ausgeprägt ist, sieht man hier eine deutliche zusätzliche Resonanz bei etwa 1100 Hz. Diese ist auch in den Daten der Aufnehmer F4 und F6 zu sehen. Sie tritt auch bei den gemessenen TDRs auf.

In Abbildung 6.16 sind die entsprechenden BDS auch für die Überfahrt mit der Lok zu sehen. Hier liegen die gemessenen Daten an der Fehlstelle erneut nicht so stark über denen des Referenzschwellenfachs. Nur für den Aufnehmer F5 beträgt die Differenz zur Referenz für Frequenzen über ca. 200 Hz stets um die 20 dB, während der qualitative Verlauf des BDS sich hier nicht signifikant von der Referenz unterscheidet.

Die Spektren der Aufnehmer F4 und F6 liegen für Frequenzen unter ca. 250 Hz sogar deutlich unter denen der Referenz, während die *pinned-pinned*-Frequenz auch hier stärker angeregt wird und auch die folgende Resonanz (wieder bei etwa 1100 Hz) bei allen drei Aufnehmern an der Fehlstelle deutlich zu erkennen ist.

Auch hier sind ergänzend in den Abbildungen A.11 und A.12 die BDS des RailDrive und der Lok an der Fehlstelle 2 in positiver Fahrtrichtung zu sehen.

Die hier gezeigten Werte sind den zuvor besprochenen der negativen Fahrtrichtung sehr ähnlich. Jedoch lässt sich sowohl bei der Lok wie auch bei dem RailDrive erneut eine Verschiebung der *pinned-pinned*-Resonanzfrequenz in den tieffrequenten Bereich in Bezug auf die Referenzschwelle erkennen. Dieser Effekt tritt bei der negativen Fahrtrichtung nicht so deutlich auf und kann somit wahrscheinlich mit dem Schwellenwechsel assoziiert werden.

Für die beobachteten Unterschiede zwischen dem guten Schwellenfach und den beiden Fehlstellen gibt es wahrscheinlich vor allem zwei Erklärungen. Zum einen treten in Schweißnähte durch die im Fertigungsprozess bedingte örtliche Erwärmung und somit verhinderte Wärmeausdehnung stets Schrumpfungen, Eigenspannungen und teilweise Verformungen innerhalb der Struktur auf [55, S.125-197]. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass an der Stelle der Schweißnaht Reflexionen von Wellen in der Schiene auftreten. Dadurch können zusätzliche Resonanzen im Vergleich zum guten Schwellenfach auftreten. Dies wird zum Beispiel an Fehlstelle 1 und 2 in Bezug auf den Peak bei etwa 1,1 kHz vermutet. Im tieffrequenten Bereich sind hiedurch eventuell auch die teilweise niedrigeren Werte im BDS, insbesondere an Fehlstelle 2, zu erklären, da hier die erwarteten Resonanzen des Referenzschwellenfachs überlagert werden.

Zum anderen konnte in Abschnitt 6.3 gezeigt werden, dass sich durch eine Veränderung der Schiene wie an den Fehlstellen die Mobilität der Schiene ändert. Dies geschieht, da beispielsweise durch die Lochbohrung, aber auch durch schlecht verarbeitete Schienenstöße, die Steifigkeit der Schiene reduziert wird. Dadurch sind eventuell die größtenteils höheren Messwerte an den Fehlstellen im Vergleich mit dem guten Schwellenfach zu erklären.

Über weite Frequenzbereiche haben die BDS im Bereich der beiden Fehlstellen höhere Werte als das Referenzschwellenfach. Deshalb kann es gut sein, dass in diesen Bereichen eine höhere Schallabstrahlung auftritt.

6.5 Schwingverhalten der Schiene bei Zugvorbeifahrten

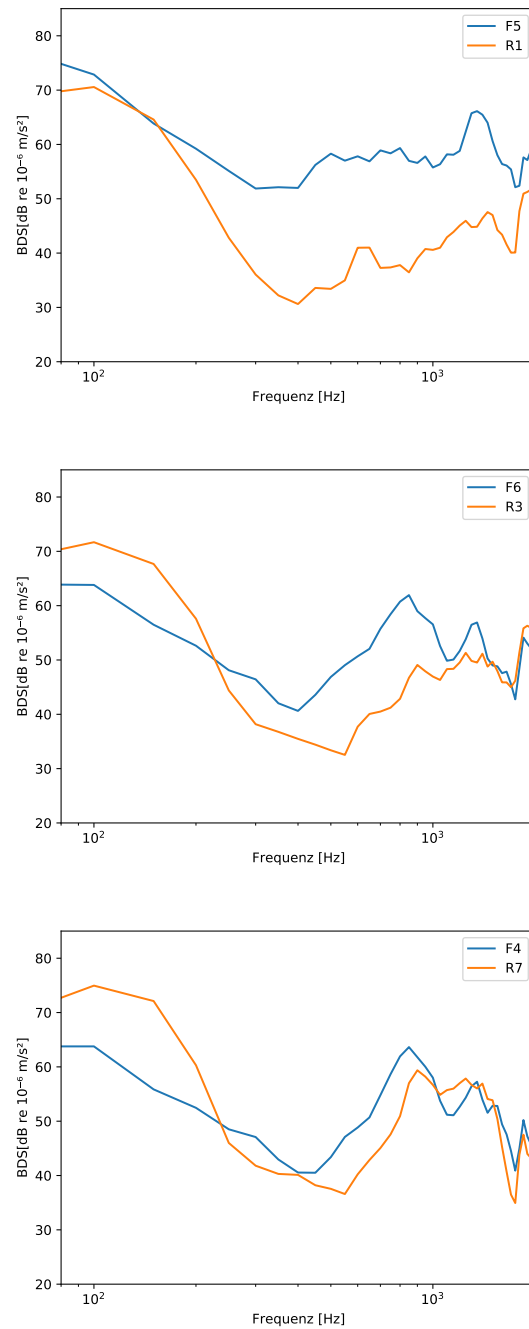


Abbildung 6.16: BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 24,6 km/h in negativer Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 2 (linke Schiene) und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach (rechte Schiene)

6.6 Synchronisierung der schienen- und fahrzeugseitigen Messungen

Durch die in Abschnitt 4.2 geschilderten Empfangsprobleme in den beiden Fahrzeugen sind die Radioaufzeichnungen teilweise stark mit Rauschen überlagert. Bei den Aufnahmen aus der Lok sind über einige Abschnitte keine Audioaufzeichnungen des Radios hörbar, sondern nur Rauschen. Dies ist im Anhang in Abbildung A.13 zu sehen. Dort ist auch das bearbeitete Audiosignal zu sehen, bei dem die starken Störimpulse nicht mehr berücksichtigt wurden. Auch nach Bearbeitung der Daten ist ein Teil des Audiosignals nur Rauschen.

Die Aufnahmen am RailDrive haben eine deutlich bessere Qualität.

Eine entsprechende Korrelationsfunktion der Radiodaten aus dem RailDrive mit den Radiodaten des Mehrkanalsystems Typhoon neben den Gleisen ist in Abbildung 6.17 zu sehen. Wie bei allen Korrelationen der Radiosignalaufnahmen des RailDrive mit den schienenseitigen Aufnahmen ist hier ein eindeutiger Peak zu erkennen. Dieser liegt in dem dargestellten Beispiel bei Sample 285162 der Messung. Dies entspricht bei der verwendeten Abtastrate einem zeitlichen Versatz von 14,2581 s zwischen den beiden korrelierten Signalen.

Um die Fehlstellen an der Schiene mit den Daten der Fahrzeuge bei Überfahrten zu verglei-

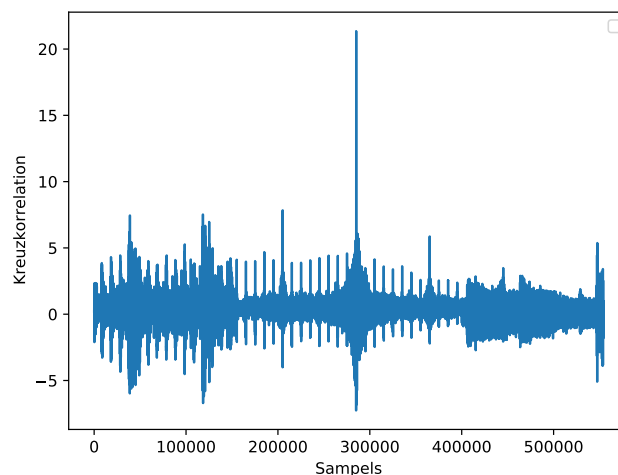


Abbildung 6.17: Beispiel der Korrelationsfunktion der Radiosignale aus schienenseitigen und fahrzeugseitigen Messungen mit dem RailDrive

chen, wird im folgenden Abschnitt auf die zeitlich synchronisierten Messungen an der Schiene und an der Fahrzeugachse eingegangen.

Durch die erwähnten Störsignale sowie das starke Rauschen in den UKW-Radioaufnahmen an der Lok, konnte hier keine Synchronisierung der Überfahrten bei Höchstgeschwindigkeit durchgeführt werden. Für langsamere Überfahrten könnte eine Synchronisierung möglich sein, wird aber nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit umgesetzt.

6.7 Achslagerbeschleunigungsmessungen

Durch die Synchronisierung der Messdaten können die ABA-Messungen mit den Beschleunigungsaufnehmern anhand einer gemeinsamen Zeitachse verglichen werden. Da die Aufnehmer an der Schiene unter anderem an den Fehlstellen geklebt wurden, können diese somit zur Bestimmung des Zeitpunkts der Fahrzeugüberfahrt an den Fehlstellen benutzt werden. Diese können dann mit Auffälligkeiten in den ABA-Daten verglichen werden.

Im Weiteren wird zunächst auf eine Einzelmessung in negativer Fahrtrichtung mit dem RailDriVe eingegangen, diese erfolgte bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von circa 30,6 km/h im Bereich der Nullschwelle. Die Geschwindigkeit nahm bei der Überfahrt der Beschleunigungsaufnehmer ab und betrug an den Lichtschranken an den Fehlstellen schon nur noch circa 20 km/h.

In Abbildung 6.18 sind die Zeitdaten der ABA-Messungen im Vergleich mit je einem Beschleunigungsaufnehmersignal von jeder Fehlstelle zu sehen. Bei den dargestellten Beschleunigungsaufnehmern handelt es sich um die Aufnehmer F1 und F5, siehe Abbildung 5.10 und Tabelle 5.3. Diese waren bezogen auf die BAs im Bereich der Fehlstellen jeweils im kürzesten Abstand zu den Schweißnähten befestigt. Die Positionen der Fehlstellen weichen trotzdem leicht von denen der Aufnehmer ab, dies ist in der Abbildung berücksichtigt worden. Außerdem sind auch die Zeitdaten des Aufnehmers R1 zu sehen, dieser war im guten Schwellenfach positioniert. Der jeweilige Zeitpunkt des Passierens der BA-Aufnehmer ist mit einer roten vertikalen Linie markiert.

In den Zeitdaten der ABA-Sensoren in Abbildung 6.18 sind sowohl links wie auch rechts

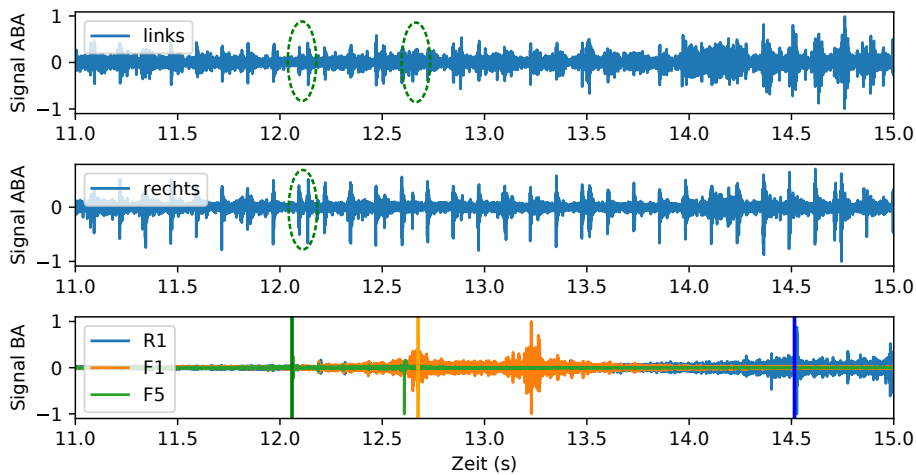


Abbildung 6.18: Synchronisierte und normierte Zeitdaten der ABA-Messungen (Sensor links und rechts) mit den BA-Messungen (R1, F1 und F5) und Markierung des jeweiligen Zeitpunktes des Passierens des BA mit einer roten vertikalen Linie, gemessen mit dem RailDriVe in negativer Fahrtrichtung

in sehr regelmäßigen Abständen Peaks zu sehen. Diese könnten den Schwellenüberfahrten

entsprechen. Vor diesen sich wiederholenden dominanten Peaks treten gelegentlich auch kleinere Signalausschläge auf. Dies ist auch zum Zeitpunkt des Passierens des Aufnehmers F5 im Bereich der Fehlstelle 2, bei Sekunde 12,059, sowohl beim linken wie auch beim rechten ABA-Sensor der Fall. Es könnte also sein, dass dieser Ausschlag auf den Schienenstoß zurückzuführen ist.

Das RailDrive passiert den Aufnehmer F1 im Bereich der Fehlstelle 1 bei Sekunde 12,675. Der Schienenstoß an dieser Fehlstelle befand sich nur an der linken Schiene. Da das Signal des linken Sensors aber allgemein im Messbereich mehr unregelmäßige Peaks aufweist, lässt sich der Einfluss der Fehlstelle hier nicht eindeutig erkennen.

Bei Sekunde 14,515 passiert das RailDrive den Aufnehmer R1 am guten Schwellenfach. In diesem Bereich sind die Abstände zwischen den Peaks an beiden ABA-Sensoren sehr regelmäßig.

In Abbildung 6.19 ist ergänzend die spektrale Leistungsdichte des ABA-Signals in Abhängigkeit der Frequenz und der Zeit dargestellt. Die gewählte Zeitachse stimmt mit den Messwerten aus Abbildung 6.18 überein. Der Zeitpunkt der Überfahrt der Beschleunigungsaufnehmer F1, F5 und R1 ist auch hier jeweils mit einer vertikalen Linie gekennzeichnet. Diese Linie entspricht dem Zeitpunkt, an dem die Radachse des RailDrive sich genau über dem jeweiligen Aufnehmer befunden hat.

Im Anhang sind ergänzend in den Abbildungen A.18 und A.19 die Messdaten für eine Überfahrt in positiver Fahrtrichtung zu sehen. Die Ergebnisse sind sich jedoch sehr ähnlich. Die in den Spektrogrammen auftretenden vertikalen Linien, die den Peaks in den Zeitdaten entsprechen, lassen durch ihren jeweiligen Abstand zueinander vermuten, dass sie auf das Überfahren der Schwellen zurückzuführen sind. Für einen Raddefekt liegen sie zu nah aneinander, da der Raddurchmesser des RailDrive 340 mm beträgt.

Im Bereich der betrachteten Fehlstellen treten in Abbildung 6.19 keine weiteren Auffälligkeiten auf. Dass die Fehlstellen anscheinend keinen großen Einfluss auf die ABA-Messungen haben, kann daran liegen, dass die Schweißnahtoberflächen an der Schiene glatt waren und somit in erster Linie keine Oberflächenfehler darstellten. Der Einfluss der veränderten Schienenschwingungen war somit zu klein, um sie im Signal detektieren zu können und sie wird von anderen Effekten verdeckt.

Zusammenfassend lassen sich keine eindeutigen Einflüsse durch die untersuchten Fehlstellen auf die betrachteten vertikalen ABA-Messungen ableiten. Hier könnte eine weitere Datenverarbeitung notwendig sein, diese ist jedoch nicht Teil der vorliegenden Arbeit. Genauer zur rein datengetriebenen Analyse von ABA-Messungen kann [56], [57] und [58] entnommen werden. Die Daten werden hier zur Detektion von einzelnen Schienendefekten genutzt, indem die Größe der Störkomponente in direktem Zusammenhang mit der Größe der Schienensingularität, die diese hervorruft, gebracht wird. Zur Auswertung der Daten wird eine *non-negative matrix factorization* als Methode der *blind signal separation* (BSS) genutzt, um die Hauptkomponenten der ABA-Daten, verursacht durch unterschiedliche Vibrationsquellen, zu trennen. Durch das numerische Trennen der unterschiedlichen Vibrationsquellen wird sich eine Quantifizierung von Schienensingularitäten und Raddefekten erhofft. [59]

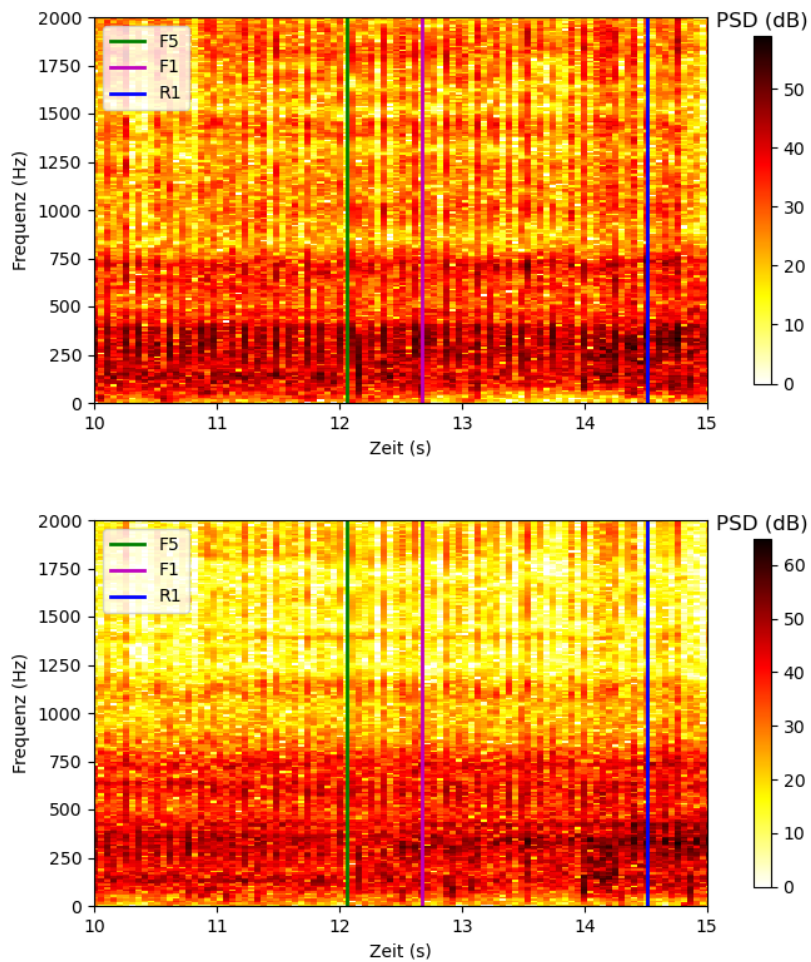


Abbildung 6.19: Spektrale Leistungsdichte der ABA-Messungen in Abhängigkeit der Zeit und der Frequenz (oben: rechter Sensor, unten: linker Sensor), gemessen mit dem RailDrivE in negativer Fahrtrichtung, der Zeitpunkt des Passierens der BA F1, F5 und R1 ist jeweils mit einer vertikalen Linie gekennzeichnet

6.8 Luftschallabstrahlung

Zum Abschluss soll die tatsächliche Luftschallabstrahlung des RailDriVe und der Lok bei Vorbeifahrten ausgewertet werden. Hierzu werden die Messdaten der beiden Mikrofonpositionen miteinander verglichen. Es handelt sich dabei um das Mikrofon 1, welches an der Referenzschwelle positioniert war, und das Mikrofon 2, welches an der Fehlstelle 2 aufgebaut wurde.

Zunächst wurde der äquivalente A-bewertete Dauerschallpegel L_{pAeq} für Vorbeifahrten bei maximaler Geschwindigkeit für beide Fahrzeuge nach Gleichung 2.1 berechnet. Das betrachtete Zeitintervall der Mikrofonsignale wurde jeweils so gewählt, dass am Beginn des Mikrofonsignalausschnitts das Mikrofonsignal um 30 % über dem Referenzrauschen lag. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.1 zusammen mit den jeweiligen Überfahrtsgeschwindigkeiten aufgelistet. In der jeweils letzten Zeile sind die Mittelwerte aus den je sechs betrachteten Überfahrten aufgetragen.

RailDriVe		
Geschwindigkeit	$L_{pAeq,M1}$	$L_{pAeq,M2}$
28,2 km/h	73,5 dB	72,3 dB
29,0 km/h	73,1 dB	73,8 dB
29,3 km/h	73,8 dB	73,3 dB
30,7 km/h	75,9 dB	74,6 dB
29,7 km/h	75,6 dB	74,3 dB
29,6 km/h	74,9 dB	76,3 dB
29,4 km/h	74,5 dB	74,1 dB

Lok		
Geschwindigkeit	$L_{pAeq,M1}$	$L_{pAeq,M2}$
23,7 km/h	75,6 dB	74,7 dB
23,4 km/h	74,1 dB	74,9 dB
24,2 km/h	76,3 dB	75,7 dB
23,7 km/h	76,0 dB	76,1 dB
24,3 km/h	76,0 dB	75,7 dB
23,8 km/h	73,5 dB	73,7 dB
23,9 km/h	75,3 dB	75,1 dB

Tabelle 6.1: Äquivalente A-bewertete Dauerschallpegel bei Fahrzeugüberfahrten mit dem RailDriVe und der Lok in positiver (weiß) und negativer (hellgrau) Fahrtrichtung an Mikrofonposition 1 (gutes Schwellenfach) und Mikrofonposition 2 (Fehlstelle 2) sowie in dunkelgrau hinterlegt der jeweiligen Mittelwerte

Es zeigt sich, dass der Unterschied zwischen den Messungen am guten Schwellenfach und an der Fehlstelle 2 nur sehr gering ist. Bei jeder Überfahrt in positiver Fahrtrichtung ist der gemessene äquivalente A-bewertete Dauerschallpegel am Mikrofon 1 höher, während genau

das Gegenteil bei Überfahrten in negativer Fahrtrichtung gilt. Da die Unterschiede kleiner als 1 dB sind, könnten sie aber auch auf Messfehler zurückzuführen sein.

Der Vergleich der Frequenzverläufe der Mikrofone erfolgt anhand der spektralen Leistungsdichte (PSD) der Signale. Diese sind jeweils zusammen mit den Zeitsignalen dargestellt. Für die beiden Fahrzeuge ist dies exemplarisch für Überfahrten in negativer und positiver Fahrtrichtung in Abbildung 6.20 zu sehen.

Bei den Überfahrten ist im betrachteten Frequenzbereich kein Unterschied zwischen den

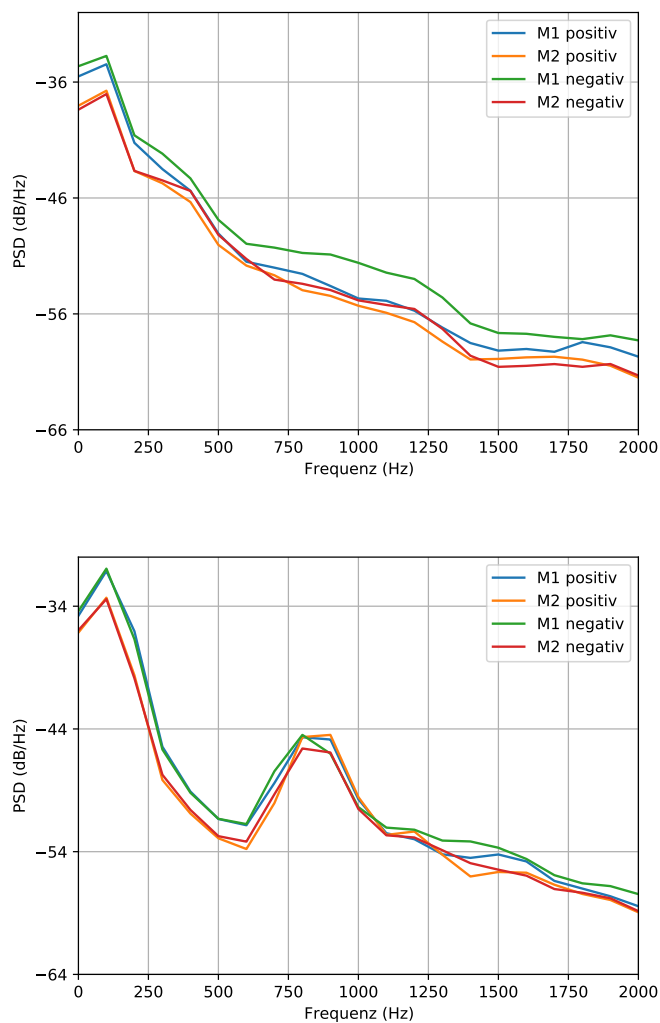


Abbildung 6.20: Vergleich PSD für Mikrofonposition 1 (gutes Schwellenfach) und Mikrofonposition 2 (Fehlstelle 2) bei Fahrzeugüberfahrten in negativer und positiver Fahrtrichtung mit dem RailDrive (oben) und der Lok (unten)

Überfahrtrichtungen erkennbar. Mikrofon 1 und 2 zeigen beide einen tieffrequenten Peak bei

etwa 125 Hz. Nur bei den Überfahrten mit der Lok ist die *pinned-pinned*-Frequenz bei circa 900 Hz deutlich zu erkennen. Entweder ist das RailDrive selbst einfach lauter oder die Masse des RailDrive reicht nicht aus, um das Gleis genug anzuregen, sodass sie im Luftschall nicht eindeutig identifiziert werden kann.

Die Ergebnisse der Messungen mit dem Mikrofon an Position 2 sind jedoch nur eingeschränkt aussagekräftig, da wie in Abschnitt 5.9 beschrieben, die Anforderungen an die Messumgebung nach DIN EN ISO 3095:2014 [16] nicht erfüllt waren. So kann der Luftschall vor allem an Fehlstelle 2 durch den teilweisen Bewuchs durch Sträucher beeinflusst worden sein. Vor allem bei dem im Messbereich befindlichen Baum muss von einer abschirmenden Wirkung ausgegangen werden.

In Abbildung 6.21 ist der Geschwindigkeitseinfluss auf die Messergebnisse zu sehen. Im Vergleich der PSD der Lok bei Höchstgeschwindigkeit sowie einer geringen Überfahrtsge-
schwindigkeit werden Unterschiede im spektralen Verhalten der PSD deutlich. Der Pegel ist bei langsamer Überfahrtsge-
schwindigkeit um bis zu 20 dB niedriger und die *pinned pinned*-
Frequenz bildet sich bei 13,6 km/h noch nicht aus.

Da alle Fahrten im niedrigen Geschwindigkeitsbereich unter 30 km/h erfolgten, muss bei

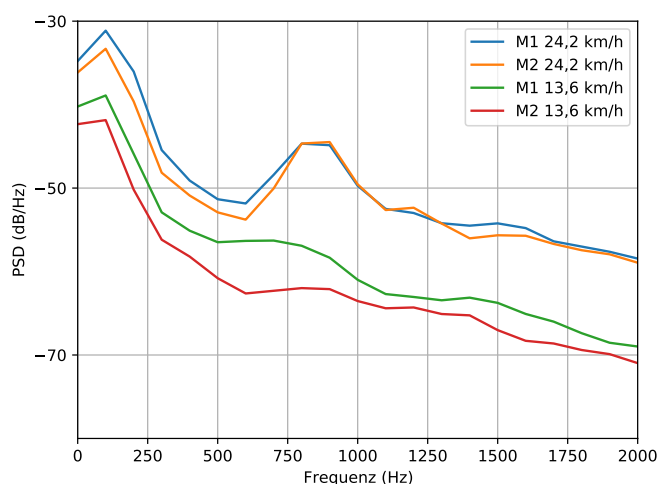


Abbildung 6.21: Vergleich PSD für Mikrofonposition 1 (gutes Schwellenfach) und Mikrofonposition 2 (Fehlstelle 2) bei Fahrzeugüberfahrten in unterschiedlicher Geschwindigkeit mit der Lok

allen durchgeführten Messungen von dominanten Aggregatsgeräuschen ausgegangen werden. Daher sind die Einflüsse der Fehlstellen auf das Rollgeräusch mit den durchgeführten Luftschallmessungen wahrscheinlich nicht nachweisbar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss von Fehlstellen am Gleis auf die Schallentstehung des Rollgeräuschs zu untersuchen. Hierzu wurden Daten im Rahmen einer Messkampagne am Gleis nahe des Braunschweiger Hafens im Sommer 2020 erhoben und ausgewertet.

In der Arbeit wird auf die Richtlinien zum Messen von Körperschall an Gleisanlagen eingegangen und es werden die dazu verwendeten Normen vorgestellt. Außerdem wird der zur Erhebung der Daten genutzte Versuchsaufbauten beschrieben. Anschließend folgt eine Erklärung der Durchführung der unterschiedlichen Messschritte, wie zum Beispiel der Rauheitsmessungen, der TDR-Messungen, der Steifigkeitsmessungen und den Vorbeifahrtsmessungen. Bei letzteren wurden schienen- und fahrzeugseitige Messdaten mittels Achslagerbeschleunigungssensoren und Beschleunigungsaufnehmern an der Schiene erhoben. Außerdem wurden die Fahrzeuggeschwindigkeit mit Lichtschranken bestimmt und die Luftschallabstrahlung neben der Schiene mit Mikrofonen gemessen.

In dieser Arbeit werden erste Ergebnisse sowohl aus den fahrzeugseitigen als auch aus den schienenseitigen Messungen vorgestellt. Die umfangreichen Messdaten werden zunächst mit Hinsicht auf die Charakterisierung des Gleises betrachtet. Es wird auf die Regelmäßigkeit der Schwellenabstände, die Steifigkeit der Schienen und ihrer Lagerung durch Auswertung von Impulsantworten und die Schienenabklingrate eingegangen. Die Messungen der Schienenabklingrate und die Rauheitsmessungen werden mit Werten aus der Literatur verglichen und auf diese bezogen bewertet.

Es folgt die Auswertung von Vorbeifahrtsmessungen mit einer Lok und einem Zweigegefahrzeug, wobei das Schwingverhalten der Schiene und die Achslagerbeschleunigungen an den Fahrzeugen betrachtet und verglichen werden.

Es kann gezeigt werden, dass die Beschleunigungsaufnehmer an der Schiene leichte Verschiebungen der Resonanzfrequenzen und teilweise zusätzliche Peaks in den Messdaten an den Fehlstellen im Vergleich mit einem guten Gleisabschnitt zeigen.

Zum Abschluss werden die Ergebnisse der schienen- und fahrzeugseitigen Messungen mit Messungen der Schallabstrahlung des Luftschalls verglichen. Hier ist kein eindeutiger Unterschied zwischen den Fehlstellen und dem guten Schwellenfach erkennbar, was wahrscheinlich an den geringen Überfahrtsgeschwindigkeiten liegt. Dies unterstreicht die Bedeutung von Körperschallmessungen zur Detektion von Fehlstellen am Gleis, die nicht immer für eine gesteigerte Schallabstrahlung direkt auf Höhe der Fehlstelle selbst sorgen, sondern durch Reflexionen teilweise Pegelerhöhungen im erweiterten Umfeld hervorrufen können.

Diese Arbeit stellt einen Einstieg in die Auswertung der Messdaten zur Untersuchung des Einflusses von Fehlstellen an der Schiene auf das Rollgeräusch dar. Ein besonderer Fokus der Betrachtungen lag auf den Fehlstellen am Gleis. So wurde ein Überblick über Unterschiede zwischen einem vergleichsweise guten Gleisabschnitt und zwei Fehlstellen gegeben. Auffällig

ist hierbei insbesondere, dass im Bereich der Fehlstellen zusätzliche Peaks in den Mobilitäten im hochfrequenten Bereich über 1 kHz und insbesondere bei 1,1 kHz auftraten. Diese konnten auch an schienenseitigen Beschleunigungsmessungen bei Fahrzeugüberfahrten beobachtet werden.

Eine zusätzliche Synchronisierung der schienen- und fahrzeugseitigen Messungen konnte zeigen, dass die Fehlstellen nicht eindeutig in den ABA-Daten zu identifizieren sind. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die Schweißnähte an den Schienenoberflächen glatt waren und somit an den Fehlstellen deren Einflüsse nicht primär auf die Achslagerbeschleunigungen übertragen haben. Auch eine Betrachtung der Luftschallabstrahlung am guten Gleisabschnitt und einer Fehlstelle zeigte keine großen Unterschiede zwischen Fehlstelle und gutem Gleisabschnitt.

Abschließend konnte also gezeigt werden, dass Fehlstellen an der Schiene in der Form von Schweißnähten, einem Schwellenwechsel sowie einer Lochbohrung die gleisseitigen Steifigkeitsmessungen beeinflussen. Sie führen auch zu höheren BDS bei Überfahrtmessungen. Dies ist jedoch nicht erstrangig bei Messungen der Luftschallabstrahlung oder ABA-Messungen der Fall.

Um den Einfluss von Fehlstellen auf das Rollgeräusch weitergehend bewerten zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig. So wären vergleichende Messungen an einem weniger fehlerbehafteten Gleisabschnitt interessant, um herauszufinden, welche Datenauffälligkeiten auf die Eigenschaften des Gleises und welche auf die Fahrzeuge zurückzuführen sind. Insbesondere da die verwendete Rangierlok und das RailDriVe jeweils nur zwei Radachsen haben, unterscheiden sich diese Fahrzeuge von gängigen Schienenfahrzeugen. Dies kann auch Einfluss auf das Rollgeräusch haben.

Auch eine Erweiterung der Fahrzeuggeschwindigkeiten wäre interessant, um in den tatsächlichen dominanten Geschwindigkeitsbereich des Rollgeräusches zu kommen. Dies könnte jedoch für die Achslagerbeschleunigungsmessungen problematisch sein, da deren Ergebnisse stark geschwindigkeitsabhängig sind. So wären für die Auswertung dieser bei hohen Geschwindigkeiten weitere Datenverarbeitungsschritte notwendig. Es gilt diese beiden Einflüsse gegeneinander abzuwägen.

In dieser Arbeit wurden nur vertikal wirkenden Kräfte betrachtet. Gerade in Bezug auf die Unregelmäßigkeiten am Gleis, wie die Variation des Abstands zwischen den beiden Schienen im Messbereich, wäre es jedoch auch von Interesse, die Auswertungen auch auf laterale und sogar longitudinale Betrachtungen zu erweitern. Die entsprechenden Messdaten liegen bei den Achslagerbeschleunigungsmessungen bereits vor.

Da der betrachtete Gleisabschnitt, wie in Abschnitt 6.1 gezeigt werden konnte, im Vergleich mit anderen Gleisen sehr rau ist, wäre auch eine weitergehende Betrachtung und Auswertung der Rauheitsmessungen von Interesse. Da die Schienenrauheit im gesamten Messbereich auf einer Strecke von über 80 m gemessen wurde, liegen hier sehr ausführliche Messdaten vor. Eine Kombination der gemessenen ortsabhängigen Rauheiten mit den ABA-Messdaten könnte so dabei helfen, die Rollgeräuschanregung durch Rauheiten an der Schiene und deren Auswirkungen auf Messungen an der Fahrzeugachse ortsgenau nachzuvollziehen.

Zusätzlich wäre eine Erweiterung des Messaufbaus denkbar, um die jeweiligen Achslagerbeschleunigungsmessungen noch eindeutiger einem Schallereignis zuordnen zu können. So wäre

es beispielsweise interessant Sensoren an beiden Radachsen zu verwenden. Eine Unebenheit der Schiene würde somit von beiden Sensoren nacheinander erfasst werden. Externe Störsignale könnten somit in der Signalverarbeitung eventuell leichter reduziert werden.

Der umfangreiche Messaufbau, der zur Erhebung der Messdaten in dieser Arbeit verwendet wurde, bietet die Möglichkeit, verschiedene Methoden der Bewertung und Detektion von Fehlstellen am Gleis zu vergleichen. Daher wäre er auch geeignet, um neue Erkenntnisse über die Auswirkungen von weiteren Arten von Fehlstellen auf das Rollgeräusch zu gewinnen. So wäre das vorgestellte Messverfahren auch für vergleichende Überfahrtsmessungen weiterer Fehlstellen wie beispielsweise Belgrospis, *Squats* oder von Schienenriffeln anwendbar. Wenn bei diesen eine genaue Analyse der Auswirkungen auf die Beschleunigungsmessungen an der Schiene, die Achslagerbeschleunigungsmessungen und die Luftschallabstrahlung gemacht werden kann, könnten auch in der Zukunft Fehlstellen noch effektiver und systematischer bewertet werden. So könnten in Zukunft schienenseitige Messungen zur Prognose der Auswirkungen von einer Fehlstelle auf die Fahrzeugachse und andersherum genutzt werden.

A Anhang

A.1 Sensoren zur Achslagerbeschleunigungsmessung an der Lok



Abbildung A.1: Montierter Achslagerbeschleunigungssensor an der Rangierlok

Zielparame-ter	Messort	Anmerkungen
TDR	an der Schiene	beide Gleise vertikal und horizontal, kleiner und großer Hammer, ein BA wird mit dem Hammer mitgeführt
Gesamtsteifigkeit des Oberbaus	an der Schiene	Messung der Impulsantwort über einer Schwelle und an den Schwellenmit-ten mit Beschleunigungsaufnehmer und Impuls-hammer
Rauheit - Rad	Räder RailDrive	Messung an dem RailDrive mit hydraulisch halb angehobenen Rädern
Rauheit - Schiene Schwellenabstände	an der Schiene an der Schiene	Messung beider Schienen, gesamter Messabschnitt es tritt im betrachteten Messbereich ein Wechsel in der verbau-ten Schwellenart auf
Beschleunigung - Schiene	an der Schiene	Beschleunigungen an der Schiene in vertikaler und horizontaler Richtung während Zugvorbeifahrten, gutes Schwellenfach und Fehlstellen
Zuggeschwindigkeit Luftschallmessung	neben der Schiene neben dem Zug	Mit drei Lichtschranken je ein Mikrofon an der Schwelle mit der Nummer 0 und an der Fehlstelle 2, Positionierung nach DIN EN ISO 3381:2011 [17]
Audiosignalmessung UKW-Radio	abseits des Messaufbaus	Aufzeichnung eines UKW-Radiosenders zur späteren Synchroni-sierung der Messsysteme

Tabelle A.1: Übersicht der schienenseitigen Messungen mit und ohne Zugvorbeifahrten

A.2 TDR-Messungen

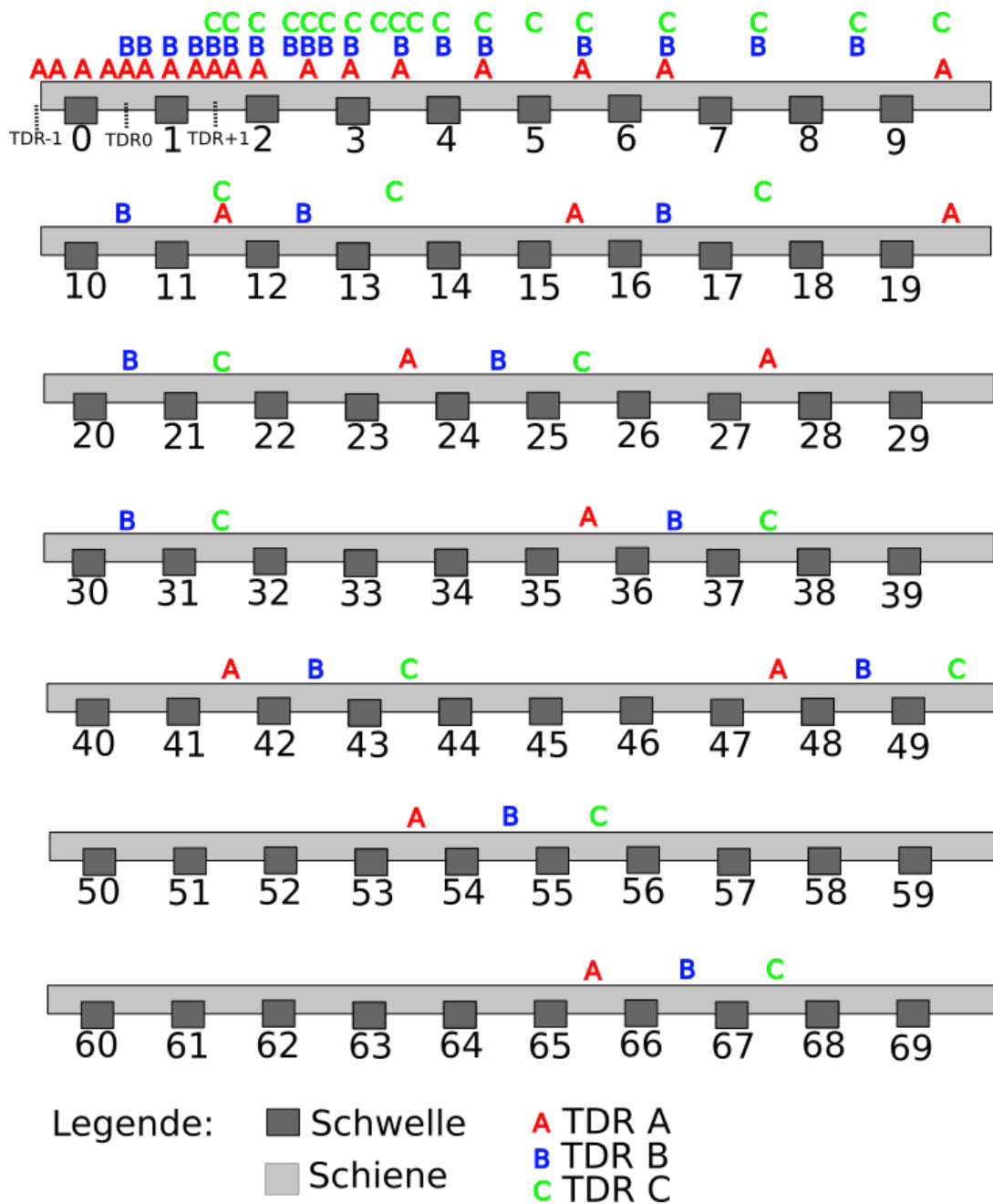


Abbildung A.2: Skizze zur Messdurchführung bei der TDR-Messung für drei benachbarte Schwellenfächer (TDR A, TDR B und TDR C), es erfolgen Impulse bei jeder mit einem Buchstaben gekennzeichneten Position, die untereinander dargestellten Schienenabschnitte schließen aneinander an

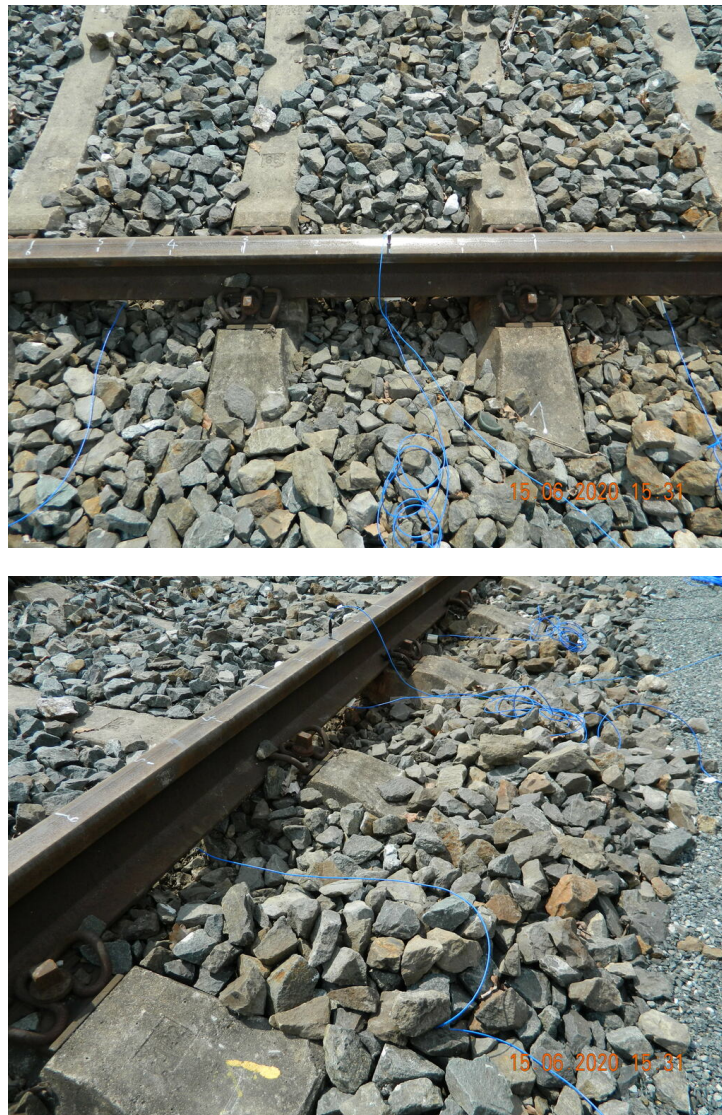


Abbildung A.3: Messaufbau der Beschleunigungsaufnehmer zum Messen der vertikalen TDR am rechten Gleis

A.2 TDR-Messungen

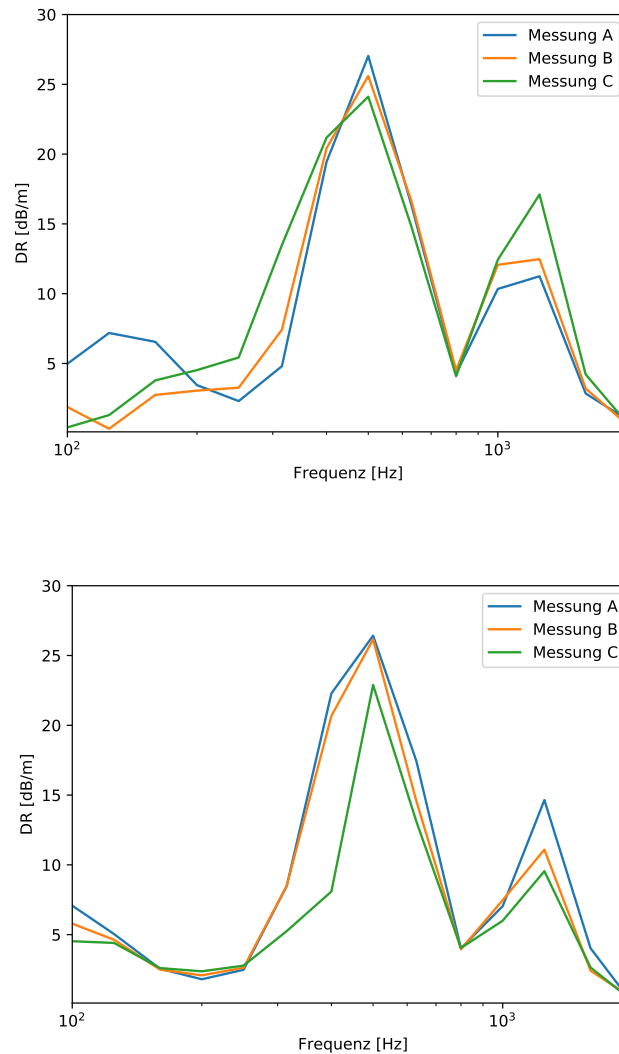


Abbildung A.4: Streuung der an drei benachbarten Schwellenfächern (A, B und C) gemessenen vertikalen TDRs dargestellt im Terzbandspektrum, gemessen in positive Richtung mit dem kleinen Impulshammer, oben: rechte Schiene, unten: linke Schiene

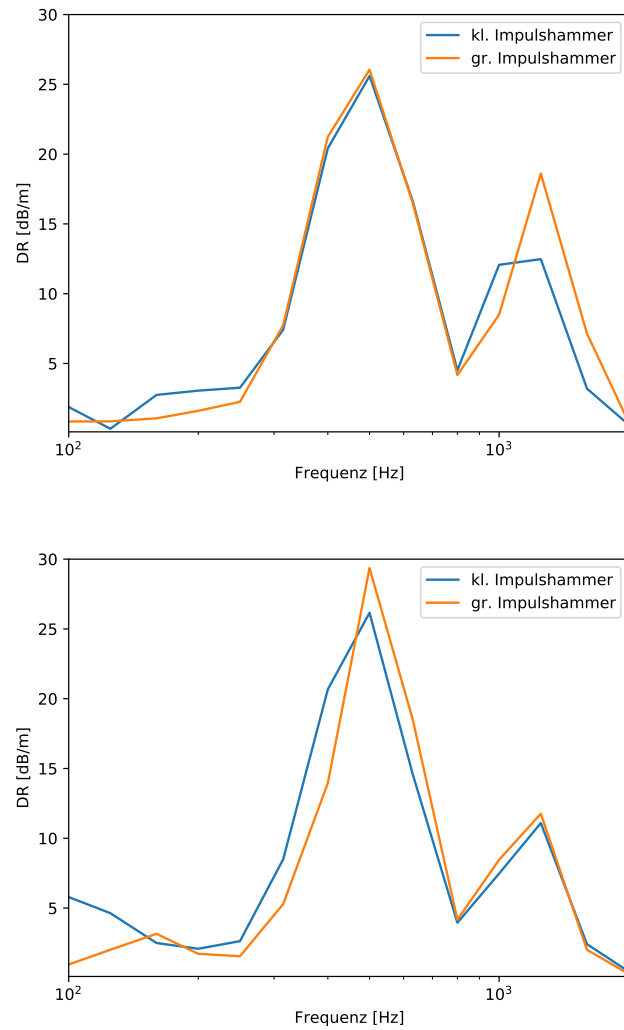


Abbildung A.5: Vergleich der in positive und negative Fahrtrichtung, gemessenen Terzbandspektren der vertikalen TDRs mit dem kleinen Impulshammer, oben: rechte Schiene, unten: linke Schiene

A.3 Vorbeifahrtmessungen

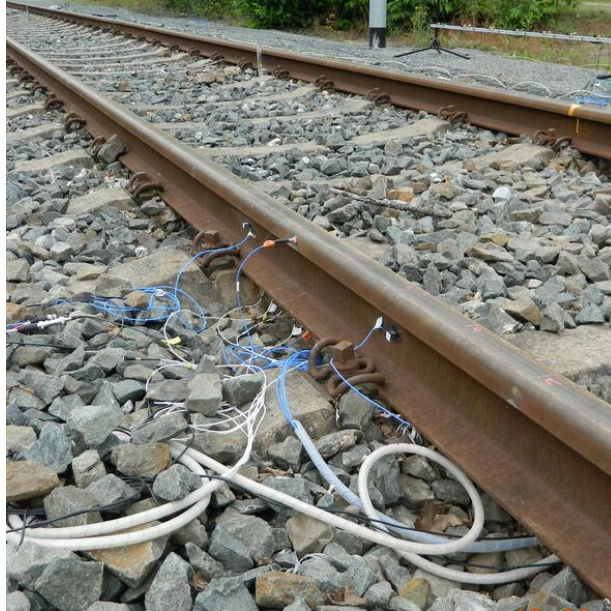


Abbildung A.6: Messaufbau für die Vorbeifahrtmessungen am linken Gleis



Abbildung A.7: Mikrofonposition für Luftschallmessungen nach DIN EN ISO 3095:2014 [16]
an Fehlstelle 2



Abbildung A.8: Lichtschranken zur Zuggeschwindigkeitsmessung

A.3 Vorbeifahrtmessungen

Fahrtrichtung	Überfahrtgeschwindigkeiten	
	Lok	RailDriVe
positiv	23,65 km/h	28,21 km/h
negativ	23,40 km/h	29,73 km/h
positiv	24,23 km/h	29,26 km/h
negativ	23,69 km/h	28,97 km/h
positiv	24,34 km/h	29,68 km/h
negativ	23,80 km/h	30,65 km/h
positiv	16,92 km/h	19,11 km/h
negativ	17,53 km/h	29,58 km/h
positiv	17,24 km/h	18,86 km/h
negativ	17,14 km/h	19,15 km/h
positiv	16,02 km/h	19,80 km/h
negativ	18,29 km/h	19,32 km/h
positiv	13,43 km/h	17,10 km/h
negativ	11,88 km/h	19,17 km/h
positiv	13,64 km/h	17,16 km/h
negativ	12,06 km/h	16,91 km/h
positiv	13,39 km/h	16,90 km/h
negativ	11,59 km/h	17,07 km/h
negativ		17,54 km/h
positiv		14,60 km/h
negativ		14,69 km/h
positiv		14,69 km/h
negativ		15,54 km/h
positiv		14,87 km/h
negativ		14,97 km/h
positiv		13,63 km/h

Tabelle A.2: Geschwindigkeit und Fahrtrichtung der gemessenen Fahrzeugüberfahrten

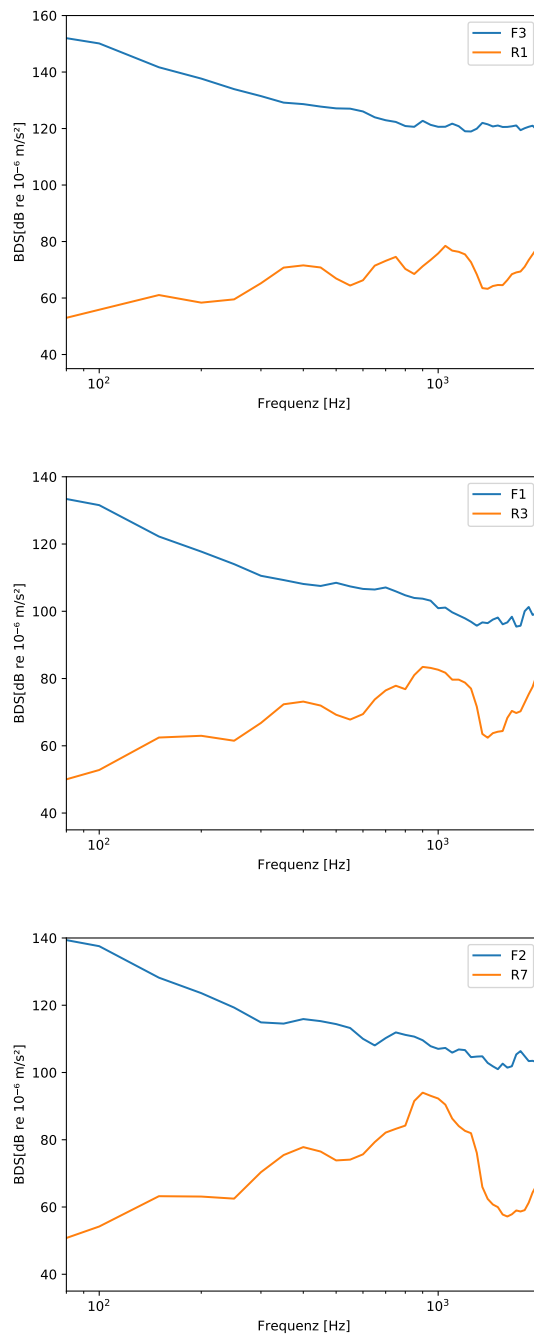


Abbildung A.9: BDS bei Überfahrten mit dem RailDriVe bei durchschnittlich 29,5 km/h in positiver Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 1 und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach

A.3 Vorbeifahrtmessungen

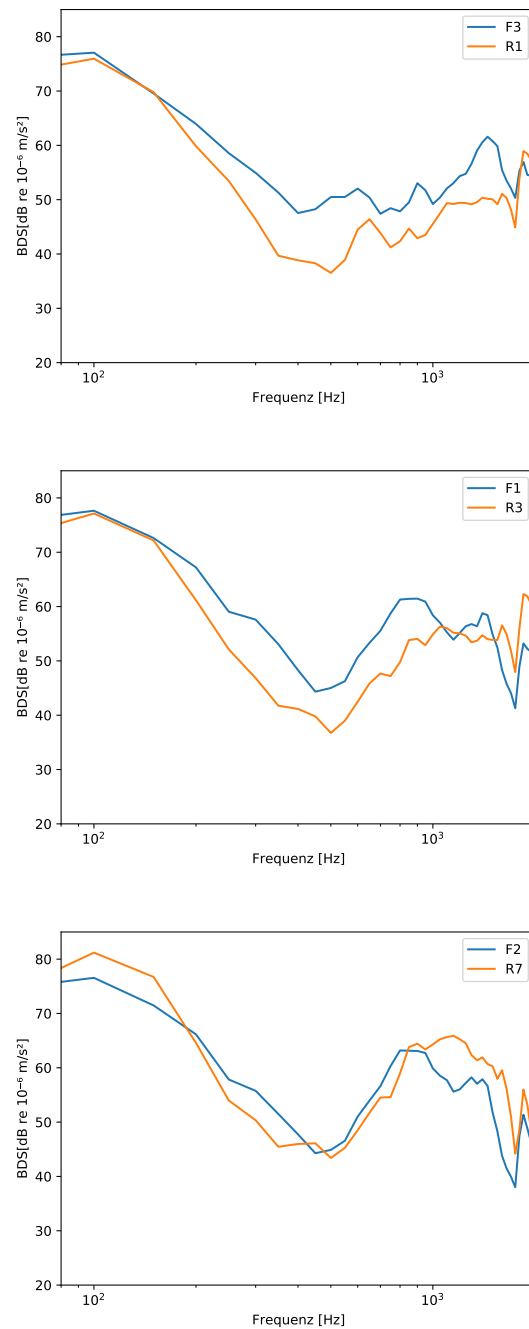


Abbildung A.10: BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 24,1 km/h in positiver Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 1 und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach

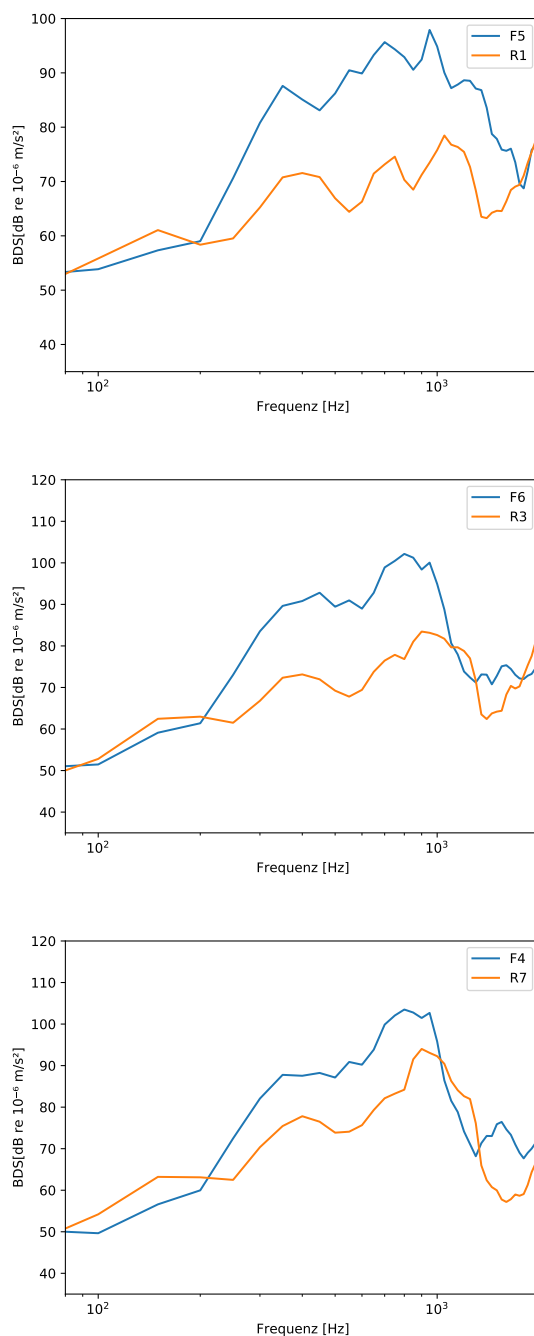


Abbildung A.11: BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 29,5 km/h in positiver Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 2 und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach

A.3 Vorbeifahrtmessungen

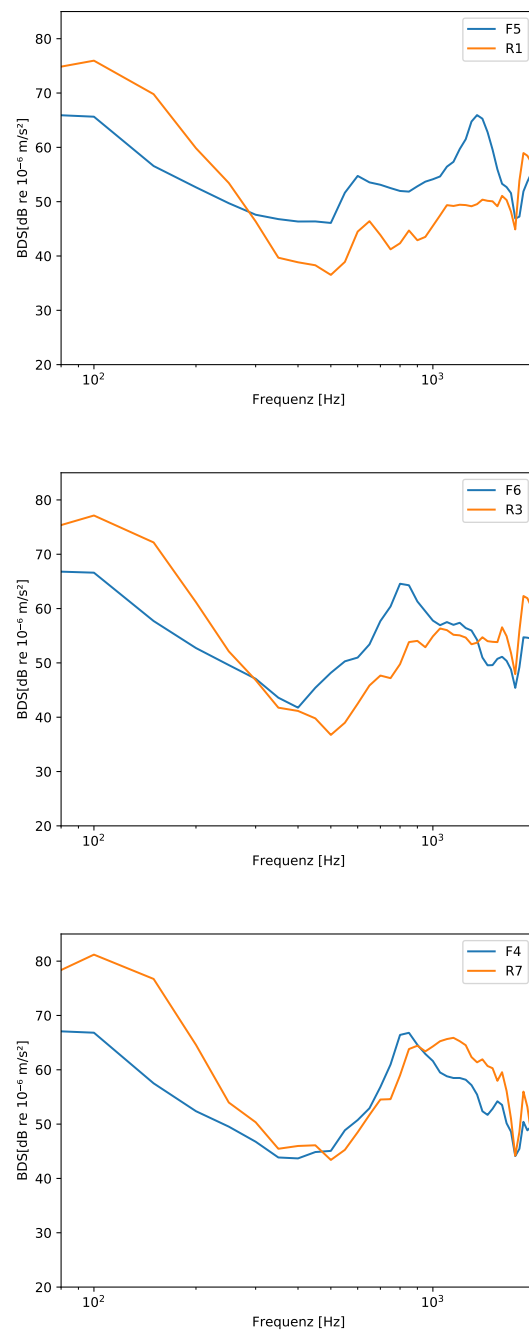


Abbildung A.12: BDS bei Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 24,1 km/h in positiver Fahrtrichtung, gemessen an der Fehlstelle 2 und dem jeweiligen Positionsäquivalent am guten Schwellenfach

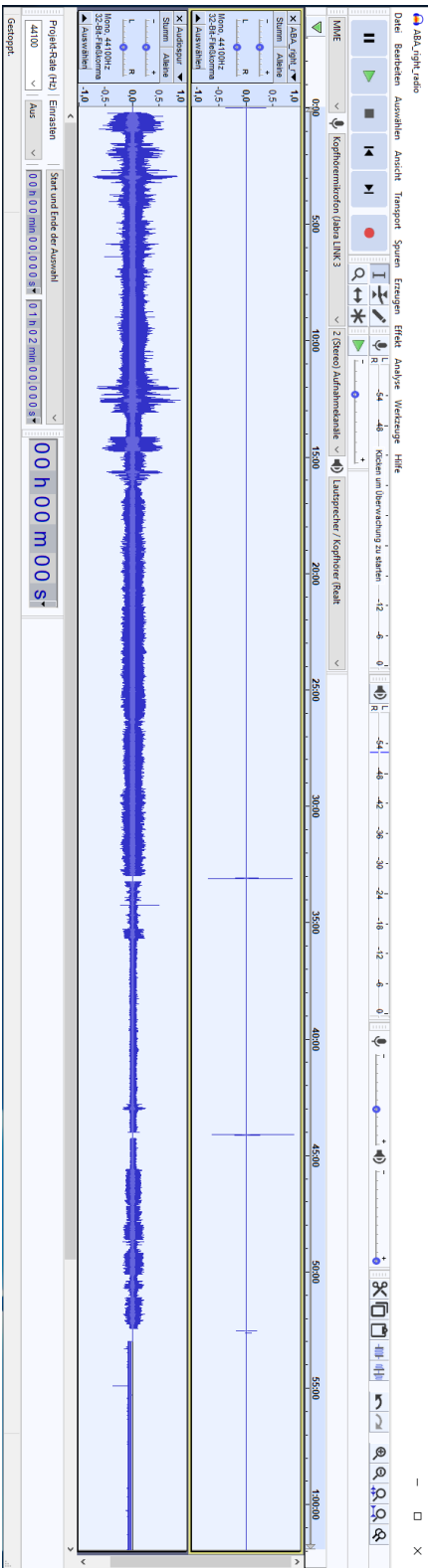


Abbildung A.13: Radioaufzeichnung der Lok während der Vorbeifahrtsmessungen im Ursprungsformat (oben) und nach Signalbearbeitung (unten)

A.4 Rauheitsmessungen

Name	Verwendung	Anmerkungen
Müller BBM m rail trolley	Messgerät für die Schienenrauheit	Sensortyp: mechanischer Weggeber, Radius der Tastspitze: 7 mm, Material Tastspitze: Hartmetall, Abtastung in Längsrichtung: 1 mm, Auflösung des Sensors: $0,1 \mu\text{m}$, Toleranz der Spur in Längsrichtung: $< 1 \text{ mm}$
Müller m wheel	BBM Messgerät für die Radrauheit	Kleinste Amplituden $< 1 \mu\text{m}$, Sensorauflösung $0,1 \mu\text{m}$, Abtastintervall $\leq 1 \text{ mm}$; Messung nur am RailDrive möglich, da keine Möglichkeit besteht, die Rangierlok aufzubocken

Tabelle A.3: Rauheitsmessgeräte

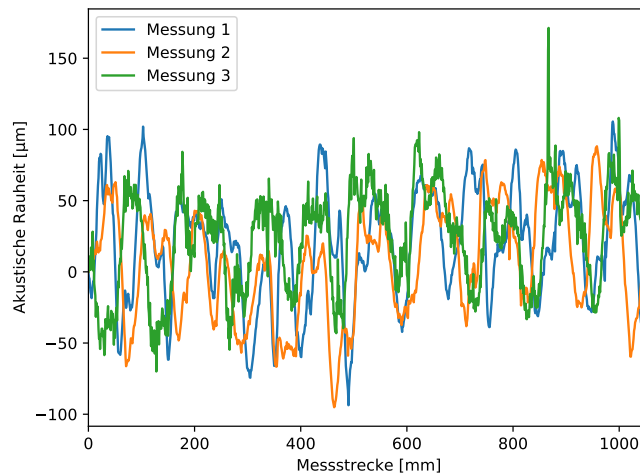


Abbildung A.14: Gemessene akustische Rauheiten im Rahmen des Reproduzierbarkeitstests der Radrauheitsmessungen

Messung	Differenz erster und letzter Messwert
1	$-19,9 \mu\text{m}$
2	$1,3 \mu\text{m}$
3	$18,9 \mu\text{m}$

Tabelle A.4: Ergebnisse des Reproduzierbarkeitstests der Radrauheitsmessungen

Schiene	Messspur Gerät	Messspur von Schienenaußenkante
rechts	0 mm	30 mm
	-5 mm	35 mm
	+5 mm	25 mm
links	-20 mm	51 mm
	-10 mm	41 mm
	0 mm	21 mm

Tabelle A.5: Messspuren bei den Schienenrauheitsmessungen

Rad	Abstand der Messspur vom Radkranz	Abstand der Messspuren
L1	5,5 cm	-5,5 mm
		-15,3 mm
		+4 mm
R1	5,5 cm	0 mm
		-10 mm
		+10 mm
R2	5,7 cm	+10,5 mm
		+0,5 mm
		+20 mm
L2	5,5 cm	0 mm
		-10 mm
		+10 mm

Tabelle A.6: Messspuren bei den Radrauheitsmessungen

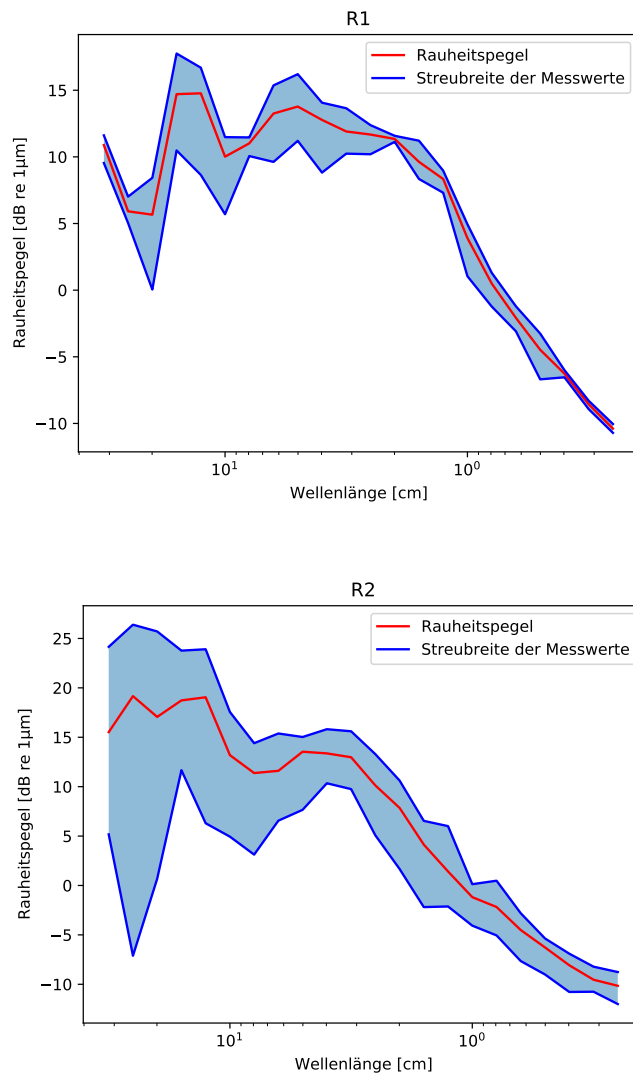


Abbildung A.16: Gemittelte Rauheitspegel für die beiden rechten Räder des RailDrive, oben: rechtes Vorderrad (R1), unten: rechtes Hinterrad (R2)



Abbildung A.17: Lauffläche der Zugräder auf der Schiene (Grenzen mit roter Linie markiert)

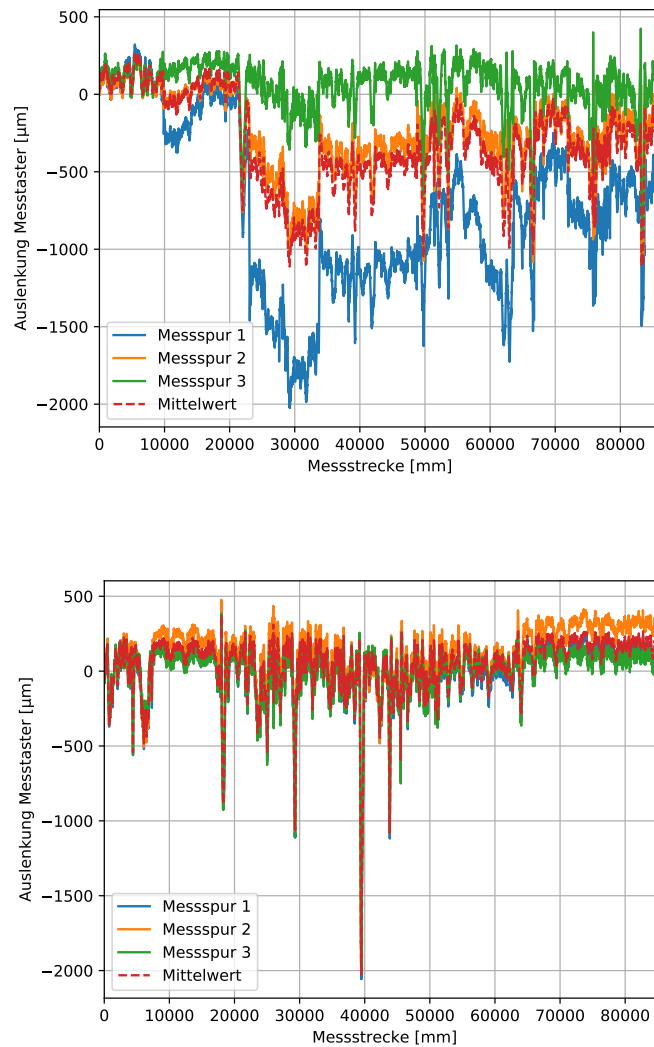


Abbildung A.15: Vergleich der jeweils drei Messspuren der Schienenrauheit, oben: linke Schiene, unten: rechte Schiene

A.5 Achslagerbeschleunigungsmessungen

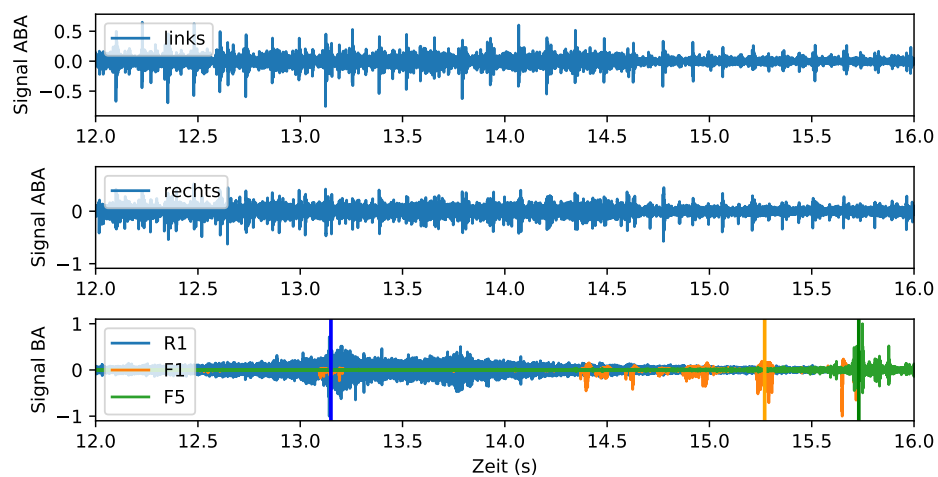


Abbildung A.18: Synchronisierte Zeitdaten der ABA-Messungen (links und rechts) mit den BA-Messungen (F1, F5 und R1), gemessen mit dem RailDrive in positiver Fahrtrichtung

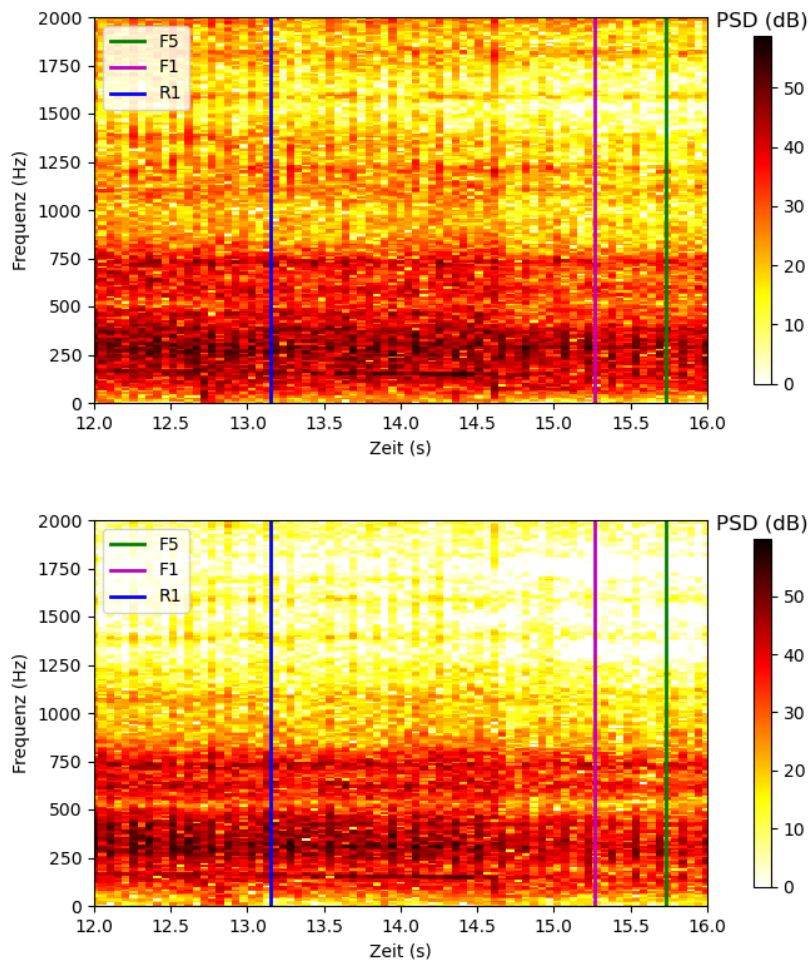


Abbildung A.19: Spektrale Leistungsdichte der ABA-Messungen in Abhängigkeit der Zeit und der Frequenz (oben: rechter Sensor, unten: linker Sensor), gemessen mit dem RailDriVe in positiver Fahrtrichtung, der Zeitpunkt des Passierens der BA F1, F5 und R1 ist jeweils mit einer vertikalen Linie gekennzeichnet

Literatur

- [1] Umweltbundesamt. *Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr*. Zugriff am 14.09.2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0>.
- [2] D. K. Mäurer und Tagesschau. *Deutschland hat Verspätung*. Zugriff am 06.09.2020. URL: <https://www.tagesschau.de/ausland/ceneri-basistunnel-101.html>.
- [3] D. Thompson. *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control*. Oxford: Elsevier, 2008.
- [4] P. Remington. „Wheel/rail noise— Part I: Characterization of the wheel/rail dynamic system“. In: *Journal of Sound and Vibration* 46.3 (1976), S. 359–379.
- [5] P. Remington. „Wheel/rail noise—Part IV: Rolling noise“. In: *Journal of Sound and Vibration* 46.3 (1976), S. 419–436.
- [6] G. Hölzl. „Bedeutung der diskret gelagerten Schiene und der Anfangsrauigkeit für den Verriffelungsprozeß und für das Rollgeräusch“. Diss. TU Berlin, 1996.
- [7] A. Nordborg. „Vertical rail vibrations: Noise and structure-borne sound generation“. Diss. Kungl Tekniska högskolan, Royal Institute of Technology, Department of Vehicle Engineering, 1998.
- [8] T. Wu und D. Thompson. „On the parametric excitation of the wheel/track system“. In: *Journal of Sound and Vibration* (2003).
- [9] M. Oppel. *Indirect Determination of the Track Decay Rate and the Wheel/Rail Roughness from Train Pass-by Rail Accelerations*. Hrsg. von Masterarbeit. 2011.
- [10] Deutsche Bahn. *Flüsterbremsen machen Züge leiser*. Zugriff am 21.09.2020. URL: https://www1.deutschebahn.com/laerm/laermreduktion_am_fahrzeug/fluesterbremsen-1096452.
- [11] Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Güterwagen werden leiser*. Zugriff am 29.09.2020. URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/gueterwagen-werden-leiser.html>.

- [12] B. Baasch, J. C. Groos und M. H. Roth. „Sensorgestützte Anomaliedetektion zur Zustandsbewertung der Schiene mit Regelzügen“. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 12 (12/2018).
- [13] B. Baasch, J. Heusel, J. C. Groos und S. Shankar. „Eingebettete Zustandsüberwachung der Gleisinfrastuktur: Entwicklung und Erprobung von eingebetteten Multi-Sensor-Systemen für die kontinuierliche Zustandsüberwachung der Gleisinfrastuktur im operativen Betrieb“. In: *Der Eisenbahningenieur EI* (12/2019), S. 6–8.
- [14] TRIMIS. *Quiet Tracks for Sustainable Railway Infrastructures*. Zugriff am 22.09.2020. URL: <https://trimis.ec.europa.eu/project/quiet-tracks-sustainable-railway-infrastructures>.
- [15] G. Müller und M. Möser. *Luftschall aus dem Schienenverkehr*. Heidelberg: Fachwissen Technische Akustik, Springer Vieweg, 2017.
- [16] DIN EN ISO 3095. „Bahnanwendungen–Akustik–Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen“. In: 2005 (2014).
- [17] DIN EN ISO 3381. „Akustik–Bahnanwendungen–Geräuschmessungen in spurgebundenen Fahrzeugen“. In: 2005 (2011), S. 05.
- [18] T. Geike. „Theoretische Grundlagen eines schnellen Berechnungsverfahrens für den Kontakt rauer Oberflächen“. Diss. TU Berlin, 2008.
- [19] C. Klaus. „Einfluss von Radparametern auf Rollgeräusche bei Schienenfahrzeugen“. Masterarb. TU Berlin, 2019.
- [20] Q. Li, D. J. Thompson und M. G. Toward. „Estimation of track parameters and wheel–rail combined roughness from rail vibration“. In: *Journal Rail and Rapid Transit* 232 (2018), S. 1149–1167.
- [21] DIN EN 15610. „Bahnanwendungen–Geräuschemission–Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch“. In: (2009).
- [22] T. Thron. „Emissionsmodell für Schienenverkehrslärm - Ein Beitrag zur Lärmprognose auf der Basis messtechnisch erfasster Modellparameter“. Diss. TU Berlin, 2010.
- [23] H. Venghaus. „Der Einfluss der Gleisparameter Schienenrauheit und TDR auf die Emissionen von Schall und Erschütterungen“. In: *DAGA Kiel*. 2017.
- [24] DIN EN ISO 3381. „Bahnanwendungen –Akustik –Geräuschmessungen in spurgebundenen Fahrzeugen“. In: (10/2019).
- [25] DIN CEN/TR 16891. „Bahnanwendungen –Akustik –Messverfahren für kombinierte Rauheit, Gleisabklingraten und Übertragungsfunktionen“. In: (03/2017).

- [26] DIN EN 15461. „Bahnanwendungen–Schallemission–Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen“. In: (2010).
- [27] C. J. C. Jones, D. J. Thompson und R. J. Diehl. „The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation“. In: *Journal of Sound and Vibration* 293 (2006), S. 485–495.
- [28] M. Oppel, T. Dr. Kohrs und B. Stegemann. „Aspekte der Anwendung des fahrwegfesten, indirekten Verfahrens zur Bestimmung der Schienenabklingrate“. In: *DAGA Berlin*. 2010.
- [29] H. Heckelmüller, F. Kendl und G. Krump. „Entwicklung eines TDR Einzahlwertes zur Charakterisierung der dynamischen Steifigkeit des Oberbaus“. In: *DAGA Aachen*. 2016.
- [30] A. Öchsner. *Theorie der Balkenbiegung*. Wiesbaden: Springer, 2016.
- [31] C. Gramowski. „Gleisseitige Schallemission - Experimentelle Quantifizierung und Bewertung konstruktiver Maßnahmen“. Diss. TU Berlin, 2013.
- [32] M. Molodova. „Detection of early squats by axle box acceleration“. Diss. TU Delft, 2013.
- [33] S. Grassie und J. Kalousek. „Rail corrugation: characteristics, causes and treatments“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 207.1 (1993), S. 57–68.
- [34] T. Hempe, R. Heyder, L. Lücking, R. Krull und M. Zacher. „Der Schienenfehler Head Check – aktuelle Erkenntnisse und Möglichkeiten der Beherrschung“. In: *EIK – Eisenbahn Ingenieur Kompendium* (01/2012).
- [35] M. Molodova, Z. Li und R. Dollevoet. „Axle box acceleration: Measurement and simulation for detection of short track defects“. In: *Wear* 271.1-2 (2011), S. 349–356.
- [36] M. Molodova, Z. Li, A. Nunez und R. Dollevoet. „Parametric study of axle box acceleration at squats“. In: *Journal of Rail and Rapid Transit* 229(8) 841–851 (2015).
- [37] P. Bocz, Á. Vinkó und Z. Posgay. „A practical approach to tramway track condition monitoring: vertical track defects detection and identification using time-frequency processing technique“. In: *Selected Scientific Papers -Journal of Civil Engineering* 13.no. s1 (2018), S. 135–146.
- [38] R. Heyder. „Die wichtigsten Schienenfehler–Beschreibung von Merkmalen, Ursachen und Abhilfemaßnahmen“. In: *Eisenbahn Ingenieur Kalender 2001* (2002), S. 177–205.

- [39] P. Salvador, V. Naranjo, R. Insa und P. Teixeira. „Axlebox accelerations: Their acquisition and time–frequency characterisation for railway track monitoring purposes“. In: *Measurement* 82 (2016), S. 301–312.
- [40] M. Wiemers. „Einfluss von Steifigkeit und Dämpfung bei Eisenbahnradern, insbesondere von Güterwagenradern, auf die Schallabstrahlung“. Diss. TU Berlin, 2005.
- [41] J. Feldmann. *Messtechnik der Akustik*. Hrsg. von M. Möser. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [42] J. Feldmann. *Körperschall-Messtechnik*. Hrsg. von M. Möser. Heidelberg: Springer, 2018, S. 1–48.
- [43] o.A. <https://www.openstreetmap.org/>. Zugriff am 20.09.2020.
- [44] Hagen F. Lothes, (HFL). *S49 Schienenmaße*. Zugriff am 22.06.2020. URL: <https://www.hfl.de/index.php/mittlere-schienen/s49>.
- [45] Bundesamt für Justiz. „Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)“. In: *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 5. April 2019 (BGBl. I S. 479) geändert worden ist* (2019).
- [46] Müller-BBM GmbH. *Rauheitsmessgeräte – m/rail trolley – m/rail – m/wheel*. Zugriff am 29.09.2020. URL: https://www.muellerbbm.de/fileadmin/user_upload/gmbh/Broschueren/MBBM_trolley_DE_web2.pdf.
- [47] P. Welch. „The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms“. In: *IEEE Transactions on audio and electroacoustics* 15.2 (1967), S. 70–73.
- [48] M. Vorländer. *Digitale Signalverarbeitung in der Messtechnik*. Hrsg. von M. Möser. Heidelberg: Springer, 2018.
- [49] hopf Elektronik GmbH. *Technical Manual DCF77 Radio Controlled Clock*. Zugriff am 01.09.2020. URL: https://www.hopf.com/downloads/manuals/6855_v1202_en.pdf.
- [50] Meinberg Funkuhren. *GPS165: GPS Satellitenempfänger mit integriertem Zeitco-degenerator*. Zugriff am 01.09.2020. URL: https://www.meinbergglobal.com/download/docs/shortinfo/german/info_gps165.pdf.
- [51] o.A. *Lexikon der Physik: Radiowellen*. Zugriff am 22.09.2020. 1998. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/radiowellen/12029>.

- [52] Grundig. *City 31 PR 3201*. Zugriff am 01.09.2020. URL: https://www.mediamarkt.de/de/product/_grundig-city-31-pr-3201-1269354.html.
- [53] J. O. Smith. „Digital Audio Resampling Home Page Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA)“. In: *Stanford University* (2020). Zugriff am 25.09.2020.
- [54] DIN EN 15610. „Bahnanwendungen–Geräuschemission–Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch“. In: (2017).
- [55] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch und J. Voßiek. *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [56] J. C. Groos, L. Johannes und S. Adam. „Zustandsüberwachung im regulären Betrieb“. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* 9 (09/2016). Hrsg. von V. D. E.-I. e.V. (VDEI), S. 114–120.
- [57] J. C. Groos, P. Havrila und L. A. Schubert. „In-service railway track condition monitoring by analysis of axle-box accelerations for small- to medium-sized infrastructure operators“. In: 376. The British Institute of Non-Destructive Testing, 07/2018, S. 5–9.
- [58] J. C. Groos, M. H. Roth und P. Havrila. „Zustandsüberwachung mit kostengünstigen Multi-Sensor-Systemen“. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* 10 (10/2017), S. 41–45.
- [59] B. Baasch, J. C. Groos, M. H. Roth und P. Havrila. „Detecting singular track defects by time-frequency signal separation of axle-box acceleration data“. In: *12th World Congress on Railway Research (WCRR), Tokyo, Japan*. 2019.